



Samuli Laaksonen

## **Saven muodonmuutosominaisuuksien määrittämenetelmien ja –laitteistojen kehittäminen**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 06.02.2014

Valvoja: Professori Leena Korkiala-Tanttu

Ohjaaja: DI Osmo Korhonen

---

**Tekijä** Samuli Laaksonen

---

**Työn nimi** Saven muodonmuutosominaisuuksien määrittämenetelmien ja –  
laitteistojen kehittäminen

---

**Koulutusohjelma** Rakenne- ja rakennustuotantotekniikka

---

**Pää-/sivuaine** Georakentaminen

---

**Professuurikoodi** Rak-50

---

**Työn valvoja** Professori Leena Korkiala-Tanttu

---

**Työn ohjaaja(t)** DI Osmo Korhonen

---

**Päivämäärä** 06.02.2014

---

**Sivumäärä** 81+30

---

**Kieli** Suomi

---

### **Tiivistelmä**

Geotekniikan mahdollisesti vaikein osa-alue on koheesiomaalajien, kuten saven muodonmuutosten ennustaminen. Saven lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia on tutkittu jo pitkään ja tarkoitukseen on kehitetty monia erilaisia tutkimusmenetelmiä ja tulkintatapoja. Tutkimusten perusteella on kehitetty useita erilaisia malleja kuvaamaan savien käyttäytymistä. Uudemmat mallit vaativat enemmän erilaisia parametreja vanhempiin malleihin nähden. Näitten parametrien määrittäminen laboratoriossa voi olla vaativaa, kestää pitkän aikaa ja tulla kalliiksi.

Työn tarkoituksena oli helpottaa ja nopeuttaa tärkeiden mallintamisessa käytettävien parametrien määrittämistä häiriintymättömistä savinäytteistä. Työssä tutkittiin häiriintymättömiä savinäytteitä, jotka on otettu Espoossa Aalto-Yliopiston pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratorion lähistöltä. Tämän saven, HUT-Clayn muodonmuutos- ja lujuusominaisuuksia tutkittiin luokitus-, ödometri- ja kolmiaksiaalikokeilla. Työssä kehitettiin uusia koemenetelmiä olemassa oleville ja uusille laitteille, kehitettiin laitteistoja ja uusia menetelmiä tulkita saatua mittaustietoa.

Työn aikana käyttöön otettu huokospaineödometri toi merkittävän lisän saven konsolidaatiotutkimukseen. Saatujen tuloksien perusteella pystytään tekemään tulkintoja saven konsolidaatiokäyttäymisestä ja sen suhtautumisesta klassisiin teorioihin. Huokospainemittauksesta pystyttiin arvioimaan eri painumalajien suuruutta uudella tulkintamenetelmällä. Tämä menetelmä osoittautui työn aikana lupaavaksi. Kokeilluista kolmiaksiaalikokeista kiinnostavampia olivat kokeet, joissa leikkausvaiheessa hydrostaattinen jännitys pidettiin vakiona ja deviatorista jännitystä nostettiin portaittain. Tällaisesta kokeesta pystytään määrittämään muodonmuutosinkrementtien avulla myötöpinnan parametrien arvot ilman usean kokeen sarjoja. Myös avoimen kokeen tilavuudenmuutoksen ja suljetun kokeen huokosvedenpaineen välillä havaittiin yhteys, jonka avulla suljetusta leikkauskokeesta pystytään määrittämään nämä samat parametrit.

---

**Avainsanat** Kolmiaksiaalikoe, ödometrikoe, huokosvedenpaine, jännityspolku, myötöpinta

---



---

**Author** Samuli Laaksonen

---

**Title of thesis** Improvement of research methods and testing equipment for deformation properties of clay

---

**Degree programme** Structural Engineering and Building Technology

---

**Major/minor** Geoengineering

---

**Code of professorship** Rak-50

---

**Thesis supervisor** Leena Korkiala-Tanttu, Professor

---

**Thesis advisor(s)** Osmo Korhonen, M.Sc.

---

**Date** 06.02.2014

---

**Number of pages** 81+30

---

**Language** Finnish

---

### **Abstract**

One of the most challenging areas of geotechnical engineering is the prediction of deformations of soft soils such as clays. Strength and deformation properties of clays have been studied over centuries resulting in development of different testing techniques and interpretation methods. As a result different types of material models have been developed in order to describe the behavior of clays. Recently developed material models require additional parameters compared with the simple models developed in the earlier days. The determination of these parameters in laboratory can be challenging and time consuming thus expensive.

The objective of this study was to improve the determination of soil parameters that are commonly used in constitutive modelling more easier and faster. In this study, undisturbed samples of HUT-Clay were taken from the vicinity of Aalto-University's laboratory of soil mechanics and foundation engineering in Espoo and were tested for several geotechnical engineering parameters. Series of classification, triaxial and oedometer tests were done on the collected HUT-Clay specimens. The oedometer cell which allowed pore water pressure measurements through the bottom of the sample was introduced in this work. Existing interpretation methods for analysing test data were improved.

The new oedometer was used to investigate the deformation behaviour of HUT-Clay. The observed behaviour was then compared with classical consolidation theories. The total settlement was divided into consolidation and creep settlements using the pore water measurement data. A new interpretation method was generated for these analyses. In triaxial testing, a promising test method was found where hydrostatic pressure was kept constant while deviatoric pressure was raised in increments. In each increment the ratio between change in volume and shear strain was calculated. The ratios were used to determine yield surface parameters. With this method it is possible to determine yield surface parameters without a series of triaxial test. The determination of corresponding yield surface parameters in undrained triaxial test was done using the observed relationship between pore water pressures in undrained triaxial test and volume changes in drained triaxial test.

---

**Keywords** Triaxial test, oedometer test, pore water pressure, stress path, yield surface

---

## Alkusanat

*Tämä diplomityö tehtiin Aalto-yliopiston pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratoriossa, joka toimi myös työn rahoittajana. Pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratoriossa on tehty useita tutkimustöitä pehmeän saven käyttäytymisestä ja tämä työ jatkaa tutkimusten sarjaa. Työn valvojana toimi georakentamisen professori Leena Korkiala-Tanttu. Työn ohjaajana toimi diplomi-insinööri Osmo Korhonen Helsingin kaupungin geotekniseltä osastolta. Suurimmat kiitokseni työn valvojalle professori Leena Korkiala-Tantulle sekä ohjaajalle diplomi-insinööri Osmo Korhoselle.*

*Edellä mainittujen henkilöiden lisäksi suuri osuus työn valmistumiseen on ollut Matti Lojanderilla, jonka neuvot ja opastus kokeiden suunnittelussa ja suorituksessa, kokeiden tulkinnessa ja kommentit työhön ovat mahdollistaneet tämän työn. Kiitos myös muulle pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratorion henkilökunnalle avusta ja neuvoista kokeiden kanssa.*

*Lisäksi haluan kiittää perhettäni, etenkin isääni kommenteista ja avusta työn aikana. Vanhoja ystäviäni, etenkin Trioa ja samaan aikaan opiskelleita hienoista opiskeluvuosista. Erityisesti kiitos Katrille ja Filille, jotka ovat tukeneet minua etenkin työn loppuvaiheen aikana.*

Espoo 6.2.2014

*Samuli Laaksonen*

Samuli Laaksonen



# Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	1
Merkinnät	2
Lyhenteet	4
1 Johdanto	1
2 Saven mekaaninen malli	2
2.1 Saven rakenne	2
2.2 Saven painumalajit	4
2.2.1 Teoriaa	4
2.2.2 Terzaghin konsolidaatioteoria	5
2.2.3 Aikafunktiot konsolidaatiopainuman parametrien määrittämisessä	8
2.3 Esikonsolidaatiojännitys	12
2.4 Saven lujuus- ja muodonmuutoskäyttäytyminen	14
2.5 Kriittisen tilan käsite	16
2.5.1 MAC-malli	19
2.5.2 S-CLAY1S	21
3 Laboratoriotekniikan kehittäminen	25
3.1 Huokospaineödometri	25
3.2 Mittaustiedon käsittely	25
3.3 Teknisen spesifikaation vaatimukset	27
4 HUT-Clay	28
4.1 Näytteenoton kuvaus	28
4.2 Luokitusominaisuudet	29
5 Ödometrikokeet	39
5.1 Laitteisto ja kokeen periaate	39
5.2 Tavallisten portaittaisten ödometrioiden tulosten tarkastelu	39
5.3 Huokospaineödometrioiden tulosten tarkastelu	45
5.3.1 Ensimmäiset kokeet ja tulokset	45
5.3.2 Kirjallisuustutkimus vastaavista kokeista	46
5.3.3 Huokoskivien ja sellin ilmaus ja muutokset tuloksissa	47
5.3.4 Painumalajien erottelu	51
6 Konsolidoidut kolmiakselialikokeet	58
6.1 Perustiedot kokeista	58
6.2 Kokeiden tulokset	64
6.3 Pystysuuntainen muodonmuutosnopeus kolmiakselialikokeissa	66
6.4 Myötöpinnan parametrien määrittäminen avoimesta- ja suljetusta kolmiakselialikokeesta	69
7 Johtopäätökset ja ehdotukset jatkotutkimuksille	76
8 Lähdeluettelo	77
Liitteet	

## Merkinnät

A	[m <sup>2</sup> ]	poikkipinta-ala
C	[-]	vakio
H	[-]	plastinen moduuli
K <sub>0</sub>	[-]	lepopaine kerroin
M	[-]	kriittisen tilan jännityssuhde
M <sub>s</sub>	[kPa]	kokoonpuristuvuusmoduuli, sekanttimoduuli
M <sub>u</sub>	[-]	suljetun tilan myötöpinnan muotoparametri
Q	[m <sup>3</sup> /s]	virtaama
S <sub>r</sub>	[%]	kyllästysaste
T <sub>v</sub>	[-]	aikakerroin
U	[%]	konsolidaatioaste
V	[cm <sup>3</sup> ]	maanäytteen kokonaistilavuus
V <sub>a</sub>	[cm <sup>3</sup> ]	huokoskaasun tilavuus maanäytteessä
V <sub>s</sub>	[cm <sup>3</sup> ]	kiinteän aineen tilavuus maanäytteessä
V <sub>v</sub>	[cm <sup>3</sup> ]	huokostilavuus maanäytteessä
V <sub>w</sub>	[cm <sup>3</sup> ]	veden tilavuus maanäytteessä
C <sub>αε</sub>	[%]	sekundääripainuman kerroin
a	[%/kPa]	hyperbelimallin parametrit
b	[1/kPa]	hyperbelimallin parametrit
c'	[kPa]	murtosuorasta määritetty tehokas koheesio
c'	[kPa]	tehokas koheesio
c <sub>v</sub>	[m <sup>2</sup> /a]	konsolidaatiokerroin
d	[mm]	halkaisija
e	[-]	huokosluku
e <sub>0</sub>	[-]	luonnontilainen huokosluku
f	[-]	myötöfunktio (myötöpinta)
f <sub>i</sub>	[-]	luonnontilainen myötöfunktio (myötöpinta)
g	[-]	plastinen potentiaalifunktio
h	[m]	suotomatka
h <sub>0</sub>	[mm]	on konsolidaatioastetta U = 0 % vastaava näytteen korkeus
h <sub>4t</sub>	[mm]	näytteen korkeus ajan hetkellä 4t
h <sub>50</sub>	[mm]	on konsolidaatioastetta U = 50 % vastaava suotomatka
h <sub>t</sub>	[mm]	näytteen korkeus ajan hetkellä t
i	[-]	hydraulinen gradientti
I <sub>c</sub>	[-]	konsistenssiluku
I <sub>L</sub>	[-]	juoksevuusluku
I <sub>p</sub>	[-]	plastisuusluku
k	[m/s]	vedenläpäisevyyskerroin
k <sub>0</sub>	[m/s]	vedenläpäisevyyskerroin kun ε <sub>1</sub> =0
k <sub>1</sub>	[-]	murtosuoran kulmakerroin
m	[-]	kokonaisluku 1, 2, 3...
m	[-]	moduuliluku
m <sub>m</sub>	[g]	määrän näytteen massa
m <sub>s</sub>	[g]	kiinteän aineen massa
m <sub>w</sub>	[g]	veden massa
n	[-]	huokoisuus
p'	[kPa]	tehokas hydrostaattinen jännitys
q	[kPa]	deviatorinen jännitys

$q_0$	[kPa]	luonnontilainen deviatorinen jännitys (taulukko 2.2)
$Q_0$	[kPa]	murtosuoran ja q-akselin leikkauspiste
$q_u$	[kPa]	deviatorinen jännitys suljetussa tilassa
$s$	[mm]	on näytteen painuma ajanhetkellä t
$s_p$	[mm]	primääripainuman loppuarvo
$t$	[s]	aika
$t_{90}$	[s]	konsolidaatioastetta $U = 90 \%$ vastaava aika
$v$	[mm/min]	nopeus
$w$	[%]	vesipitoisuus
$w_L$	[%]	juoksuraja
$w_p$	[%]	kieritysraja
$\eta_{K_0}$	[-]	lepopaineerointia vastaa $q/p'$ jännityssuhde
$p'_0$	[kPa]	tehokas luonnontilainen hydrostaattinen jännitys
$\varepsilon_1$	[%]	pystysuuntainen muodonmuutos
$\varepsilon_3$	[%]	vaakasuuntainen muodonmuutos
$\varepsilon_s$	[%]	leikkausmuodonmuutos
$\varepsilon_s^p$	[%]	plastinen leikkausmuodonmuutos
$\varepsilon_{sp}$	[%]	sekundääriosan muodonmuutos
$\varepsilon_v$	[%]	tilavuuden muodonmuutos
$\varepsilon_v^p$	[%]	plastinen tilavuuden muodonmuutos
$\rho_m$	[g/cm <sup>3</sup> ]	näytteen märkätiheys
$\sigma_1$	[kPa]	pystysuuntainen jännitys
$\sigma'_1$	[kPa]	tehokas pystysuuntainen jännitys
$\sigma'_2$	[kPa]	tehokas ensimmäinen vaakasuuntainen jännitys
$\sigma'_3$	[kPa]	tehokas toinen vaakasuuntainen jännitys
$\sigma_v$	[kPa]	vertailujännitys 100 kPa
$\tau'$	[kPa]	on tehokas leikkauslujuus
$\varphi'$	[°]	tehokas kitkakulma/leikkauskestävyyskulma
$\varphi'_c$	[°]	kriittisen tilan kitkakulma
$\Gamma$	[-]	ominaistilavuus kriittisessä tilassa jännityksessä $p'=1$
$\alpha$	[-]	anisotropiaparametri
$\alpha_u$	[-]	suljetun tilan myötöpinnan muotoparametri
$\beta$	[-]	jännityseksponentti
$\beta_k$	[-]	vedenläpäisevyyden muutosparametri
$\varepsilon$	[%]	muodonmuutos
$\varepsilon_1$	[%]	pystysuuntainen muodonmuutos
$\eta$	[-]	$q/p'$ jännityssuhde
$\kappa$	[-]	elastinen tilavuudenmuutosparametri
$\lambda$	[-]	normaalikonsolidoituneen alueen kokoonpuristuvuusindeksi
$\psi$	[-]	dilataatiokulma

## Lyhenteet

CEN	European Committee for Standardization
CSL	kriittisen tilan suora (Critical state line)
CSSM	kriittisen tilan maamekaniikka (Critical state soil mechanics)
LIR	Kuormitussuhde Ödometrikokeessa (Load increment ratio)
MAC	mekaaninen malli ansiotrooppiselle savelle (Mechanical Model for Anisotropic Clay)
NC	normaalikonsolidoitunut (normally consolidated)
NCL	normaali konsolidaation suora (normal consolidation line)
OC	ylikonsolidoitunut (over consolidated)
SL	paisumissuora (swelling line)

# 1 Johdanto

Geotekniikan mahdollisesti vaikein osa-alue on koheesiomaalajien, kuten saven muodonmuutosten ennustaminen. Saven lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia on tutkittu jo pitkään ja tarkoitukseen on kehitetty monia erilaisia tutkimusmenetelmiä ja tulkintatapoja. Tutkimusten perusteella on kehitetty useita erilaisia malleja kuvaamaan savien käyttäytymistä. Tietokoneiden laskentatehon kehittyessä myös malleista on tullut kehittyneempiä. Kehittyneemmät mallit vaativat useita erilaisia parametreja, joitten määrittäminen laboratoriossa voi olla vaativaa, kestää pitkän aikaa ja olla täten myös kallista.

Saven ongelmallisuus materiaalina johtuu sen rakenteesta. Saven rakeet ovat hyvin pieniä ja yleensä savinäytteen tilavuudesta yli puolet on vettä. Savirakeiden pienen koon takia tämä vesi ei kuitenkaan pääse vapaasti virtaamaan näytteessä, mikä pidentää kokeiden kestoa. Klassisesti saven painumisparametreja on tutkittu ödometrikokeilla ja lujuusominaisuuksia kolmiaksiaalikoikeilla. Tämän työn tavoitteena oli kehittää uudenlaisia koetekniikoita ja -laitteita, uudenlaisia tapoja suorittaa vanhoja kokeita ja uudenlaisia tapoja tulkita kokeita, jotka mahdollistaisivat tärkeiden suunnittelussa käytettävien parametrien nopeamman ja helpomman määrittämisen.

Tämä työ on tehty Aalto-yliopiston Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa ja se on jatkoa keväällä 2013 valmistuneelle erikoistytölle. Erikoistytön aiheena oli tutkia parannusmahdollisuuksia laboratorion koelaitteistoon ja tulkintamenetelmiin. Laboratoriossa on pitkät perinteet kokeiden suorittamisessa ja tulkitsemisessa. Laboratoriossa on tehty myös paljon kehitystyötä liittyen maata kuvaaviin mekaanisiin malleihin. Pienempien tutkimushankkeiden ohella on tehty myös kansainvälistä yhteistyötä ulkomaalaisten yliopistojen kanssa.

Työn aikana on suoritettu useita ödometri- ja kolmiaksiaalikoikeita. Vanhojen totuttujen koetapojen, -menetelmien ja -tekniikoiden ohella kokeita on suoritettu ja tulkittu monilla uusilla tavoilla. Tällä on pyritty selvittämään halutut parametrit helpommin ja nopeammin. Suurin muutos itse koelaitteistoon on ödometrikokeeseen lisätty huokosvedenylipaineen mittausta näytteen pohjasta.

Tässä työssä on keskitytty savitutkimuksen koelaitteistojen, -tekniikoiden, ja -tulosten tulkintojen kehittämiseen. Työ koostuu saven kuvaamisesta maamateriaalina, kokeiden kuvauksista ja koetulkinnoista. Työn aikana on tehty luokituskokeet 10 näyteputkesta ja 8 näytepussista, 11 tavallista portaittaista ödometrikokeesta, 8 huokospaineödometrikokeesta ja 15 anisotrooppisesti konsolidoitua kolmiaksiaalikoetta. Ödometri- ja kolmiaksiaalikoikeissa on käytetty vain luonnontilaisia, häiriintymättömiä näytteitä. Lisäksi käytettyjen näytteiden on oletettu olevan täysin kyllästyneitä. Tässä työssä ei ole pyritty mallintamaan saven käyttäytymistä kokeissa minkään laskentaohjelman avulla.

## 2 Saven mekaaninen malli

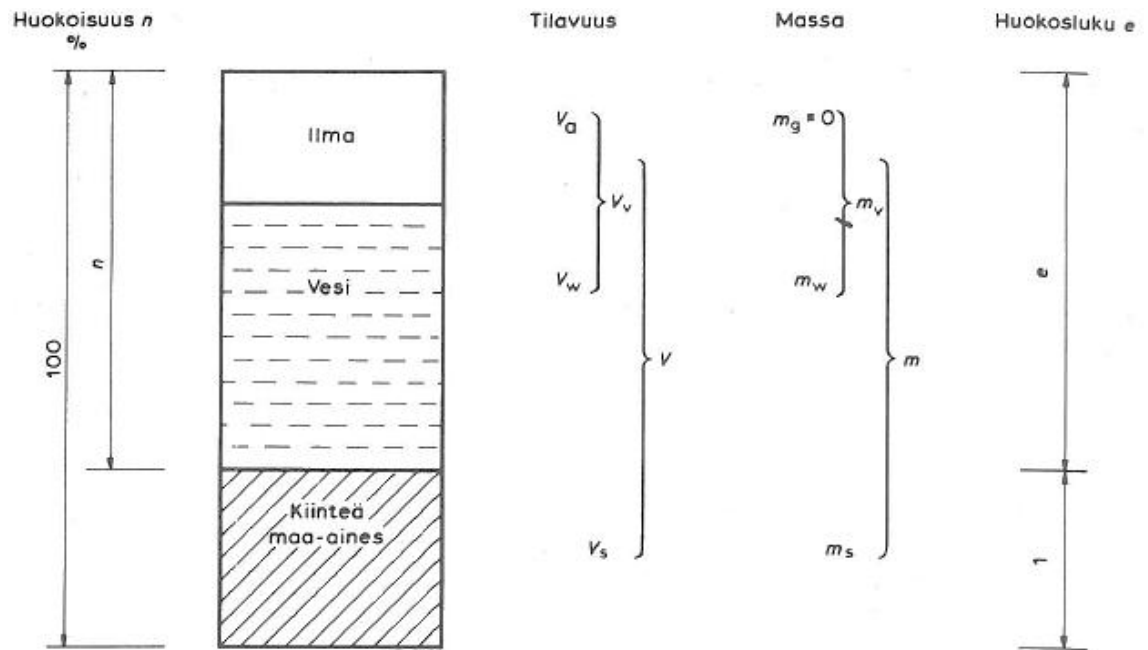
### 2.1 Saven rakenne

Savi on sedimentoitumalla syntynyttä maa-ainesta. Suomessa on yleisesti käytetty vuonna 1974 käyttöön otettua geoteknistä maalajiluokitusta, jonka mukaan savirakeen halkaisija  $d$  on enintään 0,002 mm. Saveksi maa-aines luokitellaan, mikäli se sisältää vähintään 30 painoprosenttia savirakeita ja alle 2 painoprosenttia orgaanista ainetta. Geoteknisen maalajiluokituksen mukaan savi on laihaa savea, mikäli maa-aineksessa on vähintään 30, mutta enintään 50 painoprosenttia savea. Yli 50 painoprosenttia savea sisältävää maa-ainesta kutsutaan lihavaksi saveksi. Savi on väriltään yleensä harmaata tai sinertävää, mutta esimerkiksi etenkin rannikoilla savi voi olla mustaa sulfidisavea. (Korhonen et al. 1974.)

Geoteknistä maalajiluokitusta käytetään edelleen rinnakkain vuonna 2008 käyttöön tulleen Eurokoodin mukaisen maalajiluokituksen kanssa. Eurokoodin mukaisen maalajiluokituksen mukaan savirakeen halkaisija on alle 0,002 mm. Maa-aines saa saven päänimen eli Cl (Clay) kun maalajitteesta hienoainesta, läpimitaltaan 0,063 mm, on vähintään 40 painoprosenttia ja savirakeita vähintään 20 painoprosenttia hienoaineksesta. (SFS-EN 1997-2 + AC.)

Saven rakeista suurin osa on rakenteeltaan levymäisiä. Levymäisyydestään huolimatta savirakeet muodostavat usein kennomaisia rakenteita. Savikerrokset syntyvät sedimentoitumalla. Sedimentoituminen on pitkä prosessi ja on hyvin altis ympäristön olosuhteiden muutoksille, kuten virtauksen nopeuden vaihtelulle, vuodenajoille ja virran mukana kulkevan materiaalin muuttumiselle. Sedimentaatioprosessin luonteen takia savikerrokset ovat harvoin tasalaatuisia. Geotekniikassa homogeenisuudella tarkoitetaan, että maakerroksen mekaaniset ja fysikaaliset ominaisuudet eivät muutu kerroksen sisällä. Homogeenisessa kerroksessa voi kuitenkin ilmetä anisotropiaa, jossa maakerroksen ominaisuudet eivät ole samoja joka suuntaan, mutta pysyvät homogeenisuuden määrittelyn mukaan kerroksessa vakiona. Savien syntyvän ja rakeiden muodon vuoksi anisotropia on yleistä, esimerkiksi vaakasuuntainen vedenläpäisevyys on usein suurempi kuin pystysuuntainen. Homogeenisiksi luokiteltavat savikerrokset ovat yleensä hyvin ohuita, käytännön syistä joudutaan usein oletamaan paksumpia kerroksia homogeenisiksi.

Kuten kaikki aines maaperässä, myös savi voidaan jakaa kiinteään ainekseen eli savirakeisiin ja huokostilaan. Jos savinäytteen kokonaistilavuus on  $V$ , se voidaan jakaa kuvan 1.1 mukaisesti savirakeiden tilavuuteen  $V_s$  ja huokosten tilavuuteen  $V_v$ , huokosten tilavuus voidaan vielä jakaa näytteessä olevan huokosveden tilavuuteen  $V_w$  ja huokoskaasun tilavuuteen  $V_a$ . Näiden tilavuuksien suhteiden ilmaisemiseen käytetään erilaisia suhdelukuja, huokoisuus  $n$  kertoo huokostilavuuden  $V_v$  tilavuuden kokotilavuuteen  $V$  (kaava 2.1), huokosluku  $e$  kertoo huokostilavuuden  $V_v$  suhteen kiinteään aineeseen eli rakeiden tilavuuteen  $V_s$  (kaava 2.2). Huokoisuuden  $n$  ja huokosluvun  $e$  välille voidaan johtaa kaavan 2.3 mukainen yhteys.



Kuva 2.1. Maan eri komponenttien väliset tilavuus- ja massasuhteet (Lojander, 1985.)

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (2.1)$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.2)$$

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (2.3)$$

missä  $n$  on huokoisuus [-]  
 $V_v$  huokosten tilavuus [ $\text{m}^3$ ]  
 $V$  maanäytteen kokonaistilavuus [ $\text{m}^3$ ]  
 $e$  huokosluku [-]  
 $V_s$  kiinteän aineen eli rakeiden tilavuus [ $\text{m}^3$ ]

Maan huokostilassa olevalla vedellä on suuri vaikutus maa-aineksen lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiin. Geotekniikassa näytteessä olevan veden määrää kuvaamaan käytetään termiä vesipitoisuus  $w$ , joka kertoo näytteessä olevan veden massan ja näytteessä olevan kuivan aineksen massan suhteen (kaava 2.4). Lisäksi kyllästysaste  $S_r$  kertoo, kuinka suuri osa näytteen huokostilavuudesta  $V_v$  on veden täyttämää (kaava 2.5).

$$w = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (2.5)$$

missä  $w$  on vesipitoisuus [%]  
 $m_w$  näytteessä olevan veden massa [g]  
 $m_s$  näytteen kuivan aineksen massa [g]  
 $S_r$  Kyllästysaste [%]  
 $V_w$  näytteessä olevan veden tilavuus [ $\text{m}^3$ ]

Vesipitoisuuden muuttuessa saven olomuoto vaihtuu. Kun maassa on vain vähän vettä, se on haurasta ja helposti murtuvaa. Kun saven vesipitoisuutta kasvatetaan kieritysrajal-

le asti, maa muuttuu plastiseksi muovailtavaksi massaksi. Tämä raja voidaan määrittää kieritysrajakokeella. Maan vesipitoisuutta vielä nostettaessa saavutaan juoksurajalle, jossa maa muuttuu plastisesta juoksevaan olomuotoon, juoksuraja määritetään juoksura-jakokeen avulla. Yhtenä poikkeuksena vanhan geoteknisen maalajiluokituksen ja uuden Eurokoodin mukaisen maalajiluokituksen välillä on plastisuusominaisuuksien käyttö hienorakeisten maitten, kuten saven ja siltin luokituksessa. Kieritysrajan  $w_P$  ja juoksura-jan  $w_L$  avulla voidaan laskea plastisuutta kuvaavia suureita kuten plastisuusluku  $I_P$  (kaa-va 2.6), juoksevuusluku  $I_L$  (kaava 2.7) ja konsistenssiluku  $I_C$  (kaava 2.8). (EN ISO 14688-2.)

$$I_P = w_L - w_P \quad (2.6)$$

$$I_L = \frac{w - w_P}{I_P} \quad (2.7)$$

$$I_C = \frac{w_L - w}{I_P} \quad (2.8)$$

missä $I_P$	on plastisuusluku [-]
$w_L$	vesipitoisuus juoksurajalla [%]
$w_P$	vesipitoisuus kieritysrajalla [%]
$I_L$	juoksevuusluku [-]
$I_C$	konsistenssiluku [-]

## 2.2 Saven painumalajit

### 2.2.1 Teoriaa

Maa-aineksen muodonmuutos- ja lujuusominaisuudet ovat vahvasti yhteydessä maa-aineksessa olevaan veteen. Kyllästyneessä savinäytteessä vettä on yleensä tilavuudel-taan enemmän kuin kiinteää maa-ainesta; tästä vedestä pieni osa on sitoutunut savira-keiden pinnalle ja suurin osa on vapaata huokosvettä. Rakeiden pinnalle sitoutunut vesi ei juuri vaikuta saven muodonmuutos- ja lujuusominaisuuksiin ja tästä syystä tutkimus painottuu vapaan huokosveden ympärille. Kun savinäytteen päälle lisätään kuormaa, alkaa näytteessä tapahtua muodonmuutoksia. Mikäli näyte ei laajene vaakasuunnassa, puristuu näyte kasaan. Näytteen puristuessa kasaan sen tilavuus pienenee. Tilavuuden pieneneminen koostuu lähes ainoastaan huokostilavuuden pienenemisestä, sillä kiinteä maa-aines ja vesi voidaan olettaa lähes kokoonpuristumattomiksi vakio- $\lambda$ -lämpötilassa. Jotta huokostilavuus voisi pienetä, vaaditaan huokostilassa olevan veden poistumista. Maa-aineksen vedenläpäisevyys on riippuvainen raejakaumasta. Pienistä rakeista koos-tuvalla savella vedenläpäisevyys on hyvin pieni, mikä hidastaa huokosveden poistumis-ta ja täten myös saven muodonmuutosnopeutta.

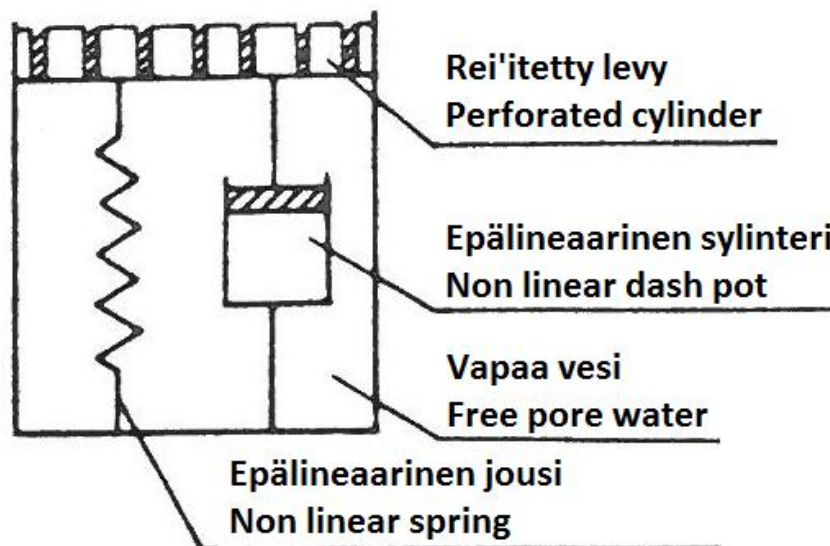
Savella vain pieni osa kokonaispainumasta tapahtuu heti kuormituksen jälkeen ja loput painumasta hitaasti huokosveden poistuessa savikerroksesta. Kuormituksen jälkeen heti tapahtuvaa painumaa kutsutaan alkupainumaksi ja hidasta muodonmuutosta kutsutaan maamekaniikassa konsolidoitumiseksi ja konsolidoituvan maakerroksen varaan peruste-tun rakenteen painumaa konsolidaatiopainumaksi. (Korhonen 1977.)

Koheesiomailla painuma voidaan jakaa kolmeen osaan: alku-, primääri- ja sekundääri-painumaan. Alkupainuma tapahtuu heti kuormituksen lisäämisen jälkeen. Primääri-painuma alkaa kuorman lisäyksen jälkeen ja sen katsotaan loppuvan, kun jännityksen



lisäyksestä johtuva huokosveden ylipaine on kokonaan purkautunut. Primääripainuma on sekundääripainumaa suurempi ainakin normaalikonsolidoituneella alueella. Konsolidaatioasteella tarkoitetaan tapahtuneen primääripainuman suhdetta koko primääripainuman suuruuteen. Kun konsolidaatioaste on 100 %, koko primääripainuma on tapahtunut. Sekundääripainuman on klassisesti oletettu alkavan kun primääripainuma päättyy. On kuitenkin havaittu, että myös sekundääripainuma alkaa kuormituksen jälkeen, joskin pienenä verrattuna primääripainumaan. Sekundääripainuman huomioonotettavia teorioita on käsitellyt esimerkiksi Korkiala-Tanttu diplomityössään (Korkiala-Tanttu, 1984).

Saven muodonmuutosta jännityksen alaisena voidaan kuvata esimerkiksi reologisilla malleilla. Reologiset mallit koostuvat erilaisista reologisista elementeistä esim. Hooke'n kimmainen jousi, Saint Venantin plastinen kappale ja Newtonin viskoosi neste. Reologisissa mallissa voidaan yhdistää useita eri elementtejä rinnakkain tai sarjaan, mallit voivat olla hyvin yksinkertaisia tai hyvinkin monimutkaisia. Esimerkki reologisesta mallista kuvassa 2.4. Reologisten mallien avulla pystytään tuottamaan matemaattisesti oikean muotoisia malleja, mutta jotka eivät kuitenkaan selitä ilmiön syitä. (Korhonen 1977.)



Kuva 2.2. Epälineaarinen reologinen malli (Korhonen 1977.)

### 2.2.2 Terzaghin konsolidaatioteoria

Terzaghi esitteli vuonna 1925 vanhimman ja tunnetuimman konsolidaatioteorian, joka vielä nykyäänkin luo pohjan yksiulotteiselle konsolidaatiolaskennalle. Konsolidaatioteoria pätee suhteellisen hyvin primäärikonsolidaatioon. Terzaghin konsolidaatioteoria lähtee liikkeelle Darcyn laista (kaava 2.10) ja oletuksesta että savikappaleelle tuleva lisäkuormitus siirtyy suoraan samansuuruiseksi huokosveden ylipaineeksi. (Terzaghi 1925.)

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (2.10)$$

missä Q on virtaama [m<sup>3</sup>/s]  
 k vedenläpäisevyyskerroin [m/s]  
 i hydraulinen gradientti [-]  
 A poikkipinta-ala [m<sup>2</sup>]

Tarkastellaan savikappaletta, jonka korkeus on  $dz$  ja pinta-ala  $A$ , savikappaleen yläpinta on etäisyydellä  $z$  valitusta referenssisitasosta. Täten Darcyn lain mukaan (kaava 2.10) veden virtaama savikappeleesta on  $Q$ , joka on tällöin myös konsolidaationopeus. Hydraulinen gradientti kaavassa 2.10 määritellään painekorkeuden erotuksen suhteena matkaan, jossa tämä painekorkeuden ero tapahtuu. Yksisuuntaisen konsolidaation tapauksessa hydraulinen gradientti  $i$  voidaan kirjoittaa muodossa

$$i = -\frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.11)$$

missä  $h$  on painekorkeuden ero

Kaavassa 2.11 edessä oleva miinus ilmaisee virtausta pienempää painekorkeutta kohti. Painekorkeuden erot johtuvat tässä tapauksessa pelkästään huokosveden ylipaineen vaihtelusta, jolloin voidaan kirjoittaa kappaleen yläpinnan gradientti muotoon

$$i_{yläpinta} = -\frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.12)$$

missä  $\gamma_w$  on veden tilavuuspaino [kN/m<sup>3</sup>]  
 $u$  huokosveden ylipaine [kPa]

Kappaleen alapinnassa syvyydellä  $z + dz$  vaikuttava gradientti on

$$i_{alapinta} = \frac{1}{\gamma_w} \left( -\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz \right) \quad (2.13)$$

Vähentämällä alapinnan gradientista (kaava 2.13) yläpinnan gradientti (kaava 2.12) ja sijoittamalla saatu gradientin muutos kaavaan 2.10 saadaan kappaleesta poistuvan veden virtaama  $Q$

$$Q = -\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} A dz \quad (2.14)$$

Jos savi on täysin vedellä kyllästynyt ja kiinteä aine oletetaan kokoonpuristumattomaksi, poistuvan veden määrä on suoraan verrannollinen kappaleen tilavuudenmuutokseen. Kappaleen huokostilavuus voidaan kirjoittaa muotoon

$$V_v = \frac{e}{1+e} A dz \quad (2.15)$$

Kaavassa 2.14 saatu virtaama  $Q$  edustaa myös huokostilavuuden muutosta ajan suhteen. Kirjoittamalla kaava 2.15 huokostilavuuden muutoksena ajan suhteen saadaan

$$Q = -\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{e}{1+e} A dz \right) \quad (2.16)$$

Miinus kertoo tilavuuden pienenevän ajan suhteen. Yhdistämällä kaavat 2.14 ja 2.16 saadaan yksiulotteisen konsolidaation perusyhtälö

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{e}{1+e} \frac{\partial}{\partial t} \quad (2.17)$$

Kaava 2.17 voidaan vielä supistaa yleiseen muotoon esittelemällä konsolidaatiokerroin  $c_v$

$$c_v = \frac{k \cdot M_s}{\gamma_w} \quad (2.18)$$

missä  $c_v$  on konsolidaatiokerroin [ $\text{m}^2/\text{a}$ ]  
 $M_s$  kokoonpuristuvuusmoduuli [ $\text{kPa}$ ]

Pystysuuntaisen jännityksen pysyessä vakiona, ainoastaan huokosvedenpaineen muutokset aiheuttavat muutoksia jännityksessä. Kokoonpuristuvuusmoduulin, huokospaineen ja huokostilavuuden välille saadaan yhteys

$$dV_v = d \frac{e}{1+e} = \frac{du}{M_s} \quad (2.19)$$

Sijoittamalla yhtälöt 2.18 ja 2.19 yhtälöön 2.17 saadaan konsolidaatioyhtälö yleiseen muotoon

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.20)$$

Terzaghin kehittämä ratkaisu yksiulotteiselle konsolidaatiolle (kaava 2.20) on voimassa kun (Taylor 1948)

1. maaperä on homogeenista
2. maaperän kyllästysaste on 100 %
3. maapartikkelit ja huokosneste ovat kokoonpuristumattomia
4. kuormitus ja huokosnesteen virtaus ovat yksiulotteisia (pystysuoria)
5. maaperän muodonmuutokset pysyvät suhteellisen pieninä
6. huokosnesteen virtaus noudattaa Darcyn lakia
7. vedenläpäisevyyskerroin ja kokoonpuristuvuusmoduuli pysyvät vakioina
8. huokosluku on suoraan verrannollinen tehokkaisuuteen jännityksiin.

Lisäksi oletetaan, että kuorman lisäys aiheuttaa maaperässä kuorman suuruutta vastaavan tasaisen huokosveden ylipaineen. Näistä todellisuutta yksinkertaistavista ehdoista voidaan sanoa, että vain ehdot 1-3 pitävät paikkansa riittävällä tarkkuudella. Suomalainen savi on yleisesti pehmeää ja kerrostunutta, jolloin muodonmuutokset ovat usein melko suuria. Tämä kumoaa ehdot 5 ja 7, sillä maa-aineksen kokoonpuristuessa myös sen vedenläpäisevyys pienenee ja kokoonpuristuvuusmoduuli kasvaa. Myös vedenläpäisevyys ja virtaus ovat usein suurempia vaakaa- kuin pystysuunnassa, joka kumoaa ehdon 4. (Terzaghi & Fröhlich 1936.)

Yksiulotteisen konsolidaation differentiaaliyhtälölle (kaava 2.20) voidaan esittää huokospaineen (kaava 2.21) ja konsolidaatioasteen (kaava 2.22) suhteen tarkka ratkaisu. (Terzaghi & Fröhlich 1936.)

$$u_{(z,t)} = \frac{4}{\pi} \Delta \sigma \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)} e^{-(2m-1)^2 \beta t} \sin \frac{(2m-1)\pi z}{2h} \quad (2.21)$$

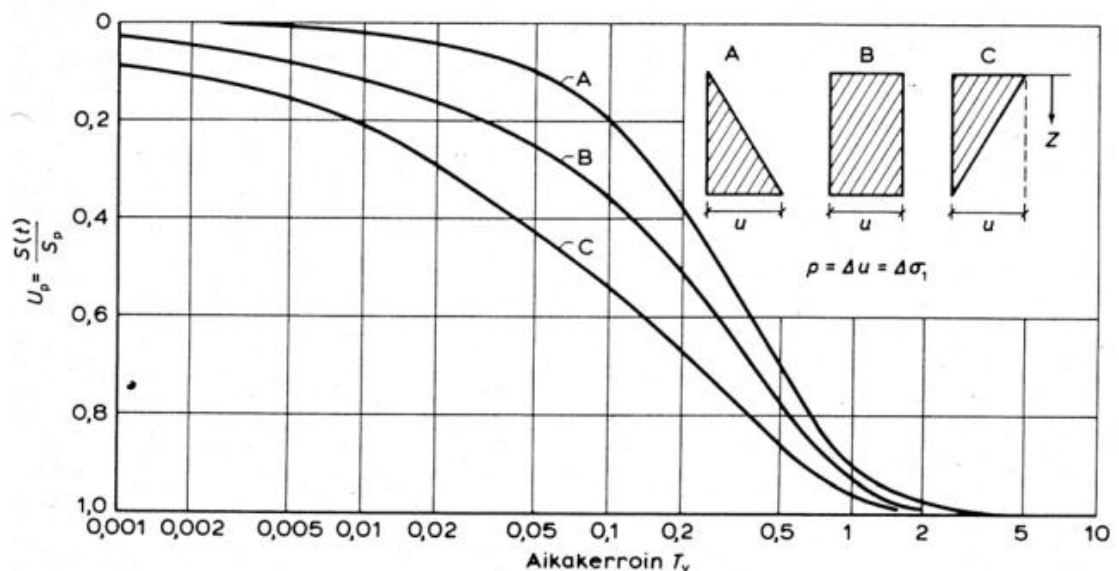
$$U = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)^2} e^{-(2m-1)^2 \beta t} \quad (2.22)$$

$$\beta = \frac{\pi^2 c_v}{4h^2} \quad (2.23)$$

$$T_v = \frac{c_v t}{h^2} \quad (2.24)$$

missä  $u$  on huokosveden ylipaine syvyydellä  $z$  ajanhetkellä  $t$  [kPa]  
 $t$  aika [a]  
 $\Delta\sigma$  jännityksen lisäys [kPa]  
 $m$  kokonaisluku 1, 2, 3... [-]  
 $h$  suotomatka [m]  
 $U$  konsolidaatioaste [%]  
 $T_v$  aikakerroin [-]

Primääripainuman konsolidaatioaste voidaan ratkaista analyttisesti myös konsolidaatioasteen ja aikakertoimen  $T_v$  yhteydestä (kuva 2.5) (Terzaghi & Peck 1948.)



Kuva 2.3. Konsolidaatioasteen  $U_p$  riippuvuus aikatekijästä  $T_v$  erilaisilla huokospaineen jakaumilla (Terzaghi & Peck 1948.)

### 2.2.3 Aikafunktiot konsolidaatiopainuman parametrien määrittämisessä

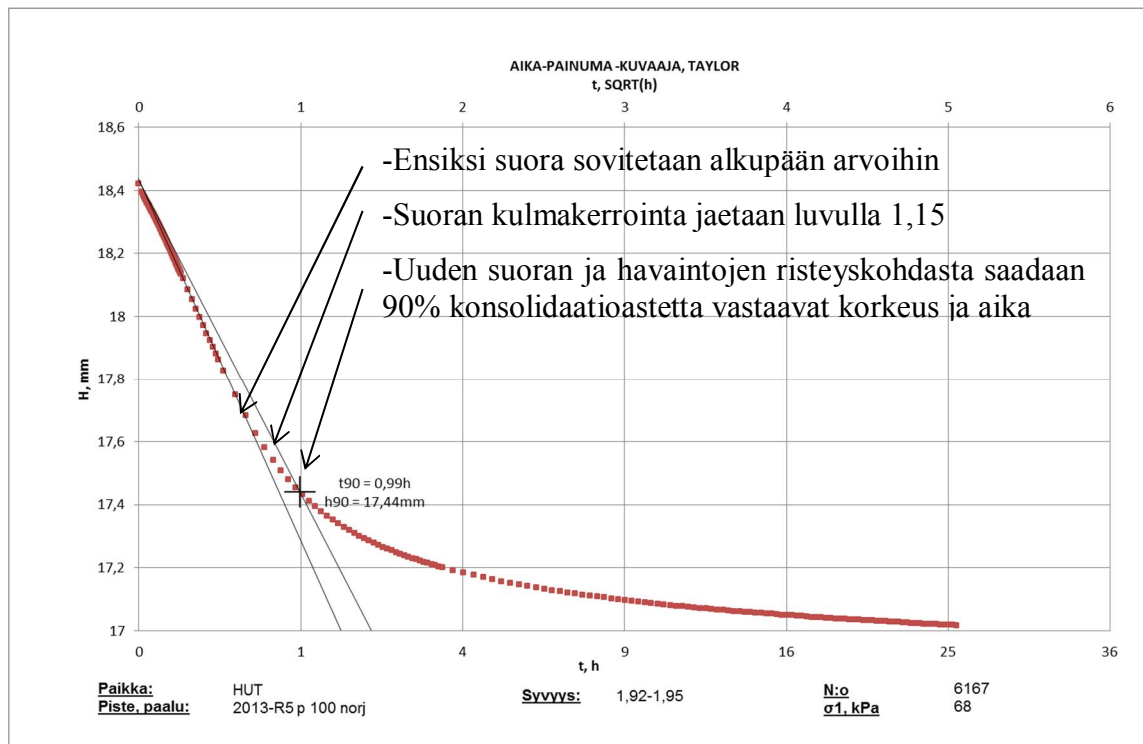
Aikafunktiot ovat matemaattisia yhtälöitä, jotka pyrkivät mallintamaan maanäytteen deformaation, tässä tapauksessa konsolidaatiopainuman ja ajan välistä yhteyttä. Täydellinen aikafunktio mallintaisi maanäytteen painumaa koko konsolidaation ajan kaikilla mahdollisilla jännitystiloilla ja -tasoilla. Maan painuminen eri jännitystiloissa ja -tasoilla ajan suhteen, on kuitenkin hyvin monimutkainen prosessi. Ja siksi aikafunktiot keskittyvätkin yleensä tiettyyn vaiheeseen esim. primääri- tai sekundääripainumaan. Vaikka aikafunktioilla ei pystytäkään mallintamaan koko painumaa, ne selkiyttävät ja yksinkertaistavat käytännön painumalaskentaa. Aikafunktioilla määritetään usein ainakin primääripainuman konsolidaatiokerroin  $c_v$ . (Korhonen 1977.)

**Taylorin menetelmässä** havaintopisteet portaittaisesta ödometrikokeesta piirretään neliöjuuriaika - näytteen korkeus tai painuma kuvaajaan (kuva 2.6). Kokeen alkuosan havaintojen kautta piirretään suora, piirretyn suoran kulmakertoimen arvo jaetaan luvul-

la 1,15. Näin saadun suoran ja havaintopisteitten risteyskohdasta saadaan konsolidaatioastetta  $U = 89 \% (\cong 90 \%)$  vastaava primääripainuman tai näytteen korkeuden ja ajan arvo. Konsolidaatioastetta  $U = 0 \%$  vastaava arvo on suorien ja pysty akselin leikkausarvo. Näiden avulla voidaan helposti laskea primääripainuman loppuarvo tai näytteen korkeus primääripainuman lopussa ja tähän vaadittava aika. Taylorin menetelmää käytettäessä konsolidaatiokertoimen  $c_v$  arvo määritetään kaavalla 2.25. (Taylor 1948.)

$$c_v = 0,848 \frac{h_{50}^2}{t_{90}} \quad (2.25)$$

missä  $h_{50}$  on konsolidaatioastetta  $U = 50 \%$  vastaava suotomatka [mm]  
 $t_{90}$  konsolidaatioastetta  $U = 90 \%$  vastaava aika [s]



Kuva 2.4. Konsolidaatiokertoimen määrittäminen Taylorin menetelmällä

**Casagranden menetelmässä** havaintopisteet portaittaisesta ödometrikokeesta piirretään logaritmiaika – näytteen korkeus tai painuma kuvaajaan (kuva 2.7). Casagranden menetelmässä piirretään kaksi viivaa. Ensimmäinen viiva sovitetaan primääripainuman alueelle, jyrkimmän tangentin kohdalle, toinen viiva piirretään sekundääripainuman havaintojen mukaan. Suorien leikkauspisteestä saadaan konsolidaatioastetta  $U = 100 \%$  vastaavat painuman tai korkeuden ja ajan arvot. Konsolidaatioastetta  $U = 0 \%$  vastaavat arvot voidaan laskea kaavalla 2.26 ja näiden avulla konsolidaatioastetta  $U = 50 \%$  vastaavat arvot ja edelleen konsolidaatiokertoimen arvo kaavalla 2.27. (Casagrande 1936.)

$$h_0 = h_t + (h_t - h_{4t}) \quad (2.26)$$

$$c_v = 0,196 \frac{h_{50}^2}{t_{50}} \quad (2.27)$$

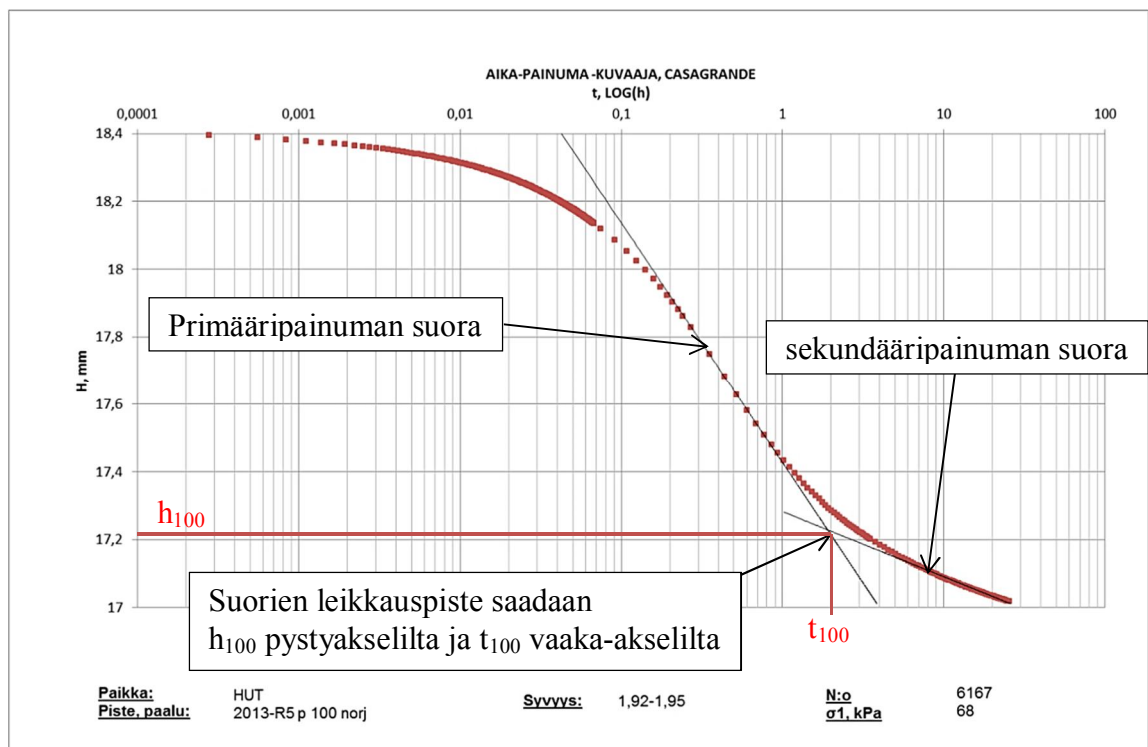
missä  $h_0$  on konsolidaatioastetta  $U = 0 \%$  vastaava näytteen korkeus [mm]  
 $h_t$  näytteen korkeus ajan hetkellä  $t$  [mm]

- $h_{4t}$  näytteen korkeus ajan hetkellä  $4t$  [mm] (ajanhetket mielellään kokeen alusta, esimerkiksi 15s ja 60s)  
 $t_{50}$  konsolidaatioastetta  $U = 50 \%$  vastaava aika [s]

Primääripainuman parametrien lisäksi Casagranden menetelmän kuvasta saadaan sekundääripainuman kerroin  $C_{\alpha\varepsilon}$  kaavan 2.28 mukaisesti, sekundääripainuman havaintojen mukaan piirretyn suoran kulmakertoimesta. (Buisman 1936.)

$$C_{\alpha\varepsilon} = \frac{\Delta\varepsilon_{sp}}{\Delta\log(t)} \quad (2.28)$$

- missä  $C_{\alpha\varepsilon}$  on sekundääripainuman kerroin [%]  
 $\varepsilon_{sp}$  sekundääriosan muodonmuutos [%]  
 $t$  aika [s]



Kuva 2.5. Konsolidaatiokertoimen määrittäminen Casagranden menetelmällä

Casagranden menetelmän heikkous välillä on sen epätarkkuus konsolidaatioastetta  $U = 100 \%$  vastaavien arvojen määrittämisessä. Taylorin menetelmä taas painottaa selvästi painuman alkupuolen ( $U < 50 \%$ ) havaintoarvoja. Ideaalitapaus kuitenkin olisi, että aikafunktio käyttäisi hyväksi kaikki kokeen pisteet parametreja määrittäessä. **Brinch-Hansen** esitti vuonna 1961 Terzaghin konsolidaatioteoriaa yhtä prosenttia pienemmällä virheellä approksimoivan ratkaisun (kaava 2.29), joka pätee koko primäärisen konsolidaation alueella, konsolidaatioasteella  $U = 0 - 100 \%$ . Menetelmä ei sovellu erityisen hyvin käsinlaskentaan ”korkeiden” potenssien takia, mutta tietokoneella tämä ei ole ongelma. Menetelmä toimii kokemusten perusteella hyvin ainakin normaalikonsolidoituneella alueella. (Brinch-Hansen 1961.)

$$\frac{s}{s_p} = U = \left[ \frac{t^3}{t_p^3 + t^3} \right]^{1/6} \quad (2.29)$$

missä  $s$  on näytteen painuma ajanhetkellä  $t$  [mm]  
 $s_p$  primääripainuman loppuarvo [mm]  
 $t_v$  karakteristinen aika portaitteisessa ödometrikokeessa [s]

Kaava 2.29 voidaan esittää muodossa 2.30, joka linearisoituu kuvan 7 mukaisessa koordinaatistossa. Koordinaatistoon havaintopisteiden kautta kulkevan suoran yhtälöstä voidaan ratkaista primääripainuman loppuarvo  $s_p$  (kaava 2.31) ja karakteristinen aika  $t_v$  (kaava 2.32). Tämän jälkeen voidaan laskea painuma ajan suhteen, tulos kuvasta 2.8 lasketuilla arvoilla näkyy kuvassa 2.9. Karakteristisen ajan avulla voidaan laskea myös konsolidaatiokerroin kaavalla 2.33. (Brinch-Hansen 1961.)

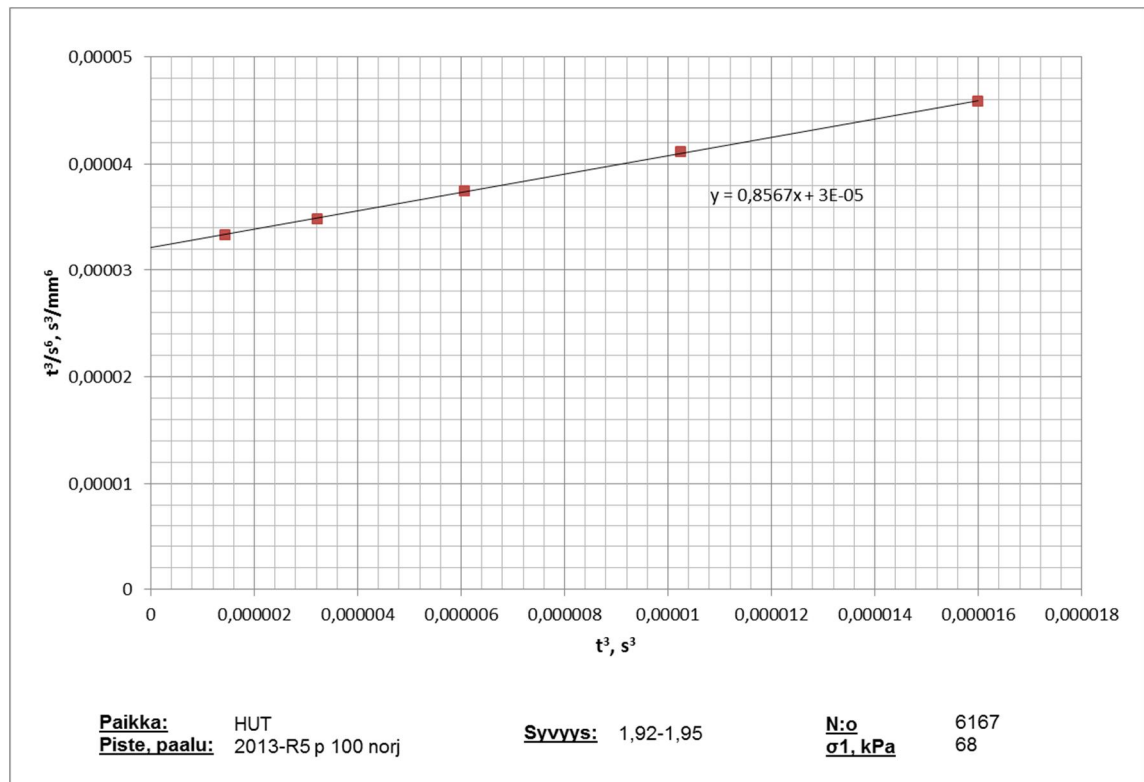
$$\frac{t^3}{s^6} = \frac{t^3}{s_p^6} + \frac{t_v^3}{s_p^6} \quad (2.30)$$

$$s_p = \sqrt[6]{1/k} \quad (2.31)$$

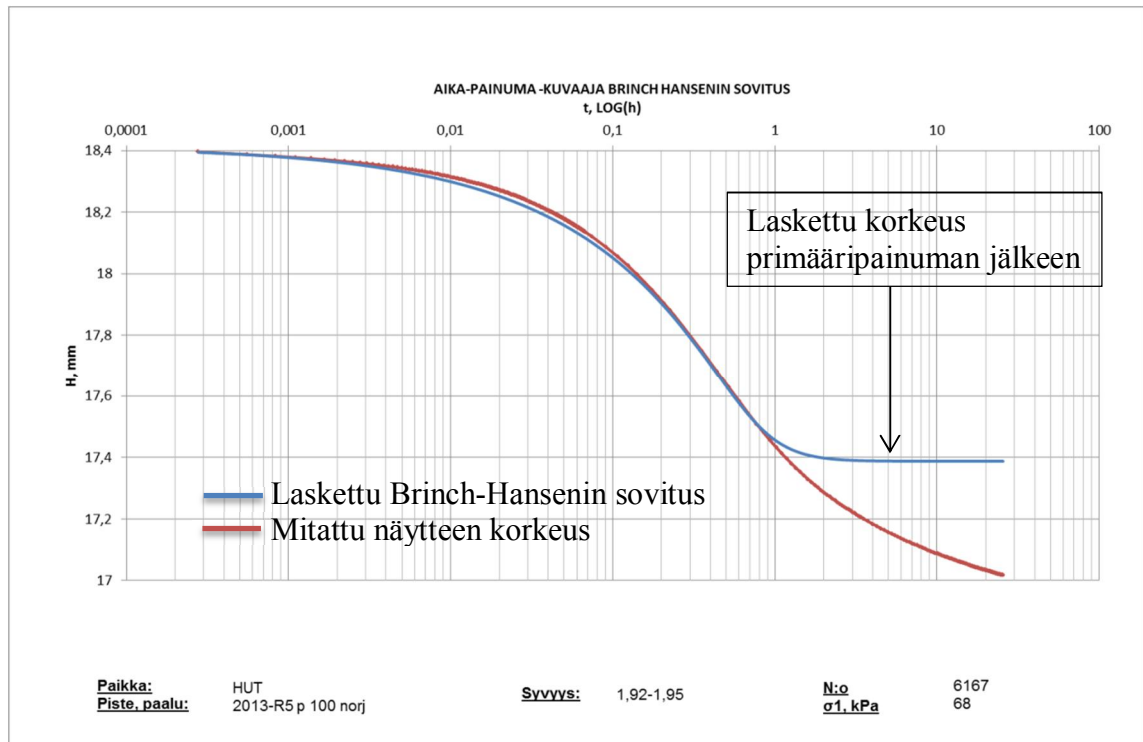
$$t_v = \sqrt[3]{b/k} \quad (2.32)$$

missä  $k$  on kuvan 5 mukaisessa koordinaatistossa muotoa  $y=kx+b$  olevan suoran kulmakerroin  $k$   
 $b$  kuvan 5 mukaisessa koordinaatistossa muotoa  $y=kx+b$  olevan suoran vakiotermi  $b$

$$c_v = \frac{\pi h^2}{4t_v} \quad (2.33)$$



Kuva 2.6. Havaintopisteiden linearisoituminen Brinch-Hansenin menetelmän mukaisessa koordinaatistossa. Havaintopisteiksi on otettu pisteet logaritmiaika-korkeus kuvaajasta jyrkimmän tangentin kohdalta.



Kuva 2.7. Brinch-Hansenin menetelmällä laskettu näytteen korkeus kuvassa sinisellä viivalla, painuma pysähtyy primääripainuman loppuarvoa vastaavaan korkeuden arvoon.

## 2.3 Esikonsolidaatiojännitys

Esikonsolidaatiojännitys  $\sigma_p$  tarkoittaa suurinta jännitystä, jota vastaavaan tilaan maaperä on joskus konsolidoitunut eli tiivistynyt. Esikonsolidaatiojännitys on tärkeä parametri, sillä maaperän muodonmuutos- ja lujuusparametrit yleensä muuttuvat merkittävästi sen kohdalla. Kun vallitseva jännitys on pienempi kuin esikonsolidaatiojännitys, ollaan ylikonsolidoituneella alueella, jännityksien ollessa samat ollaan normaalikonsolidoituneella alueella ja kun vallitseva jännitys on suurempi kuin esikonsolidaatiojännitys, ollaan alikonsolidoituneella alueella. Alikonsolidoitunut tila muuttuu normaalikonsolidoituneeksi, kun savi konsolidoituu kyseisen kuormituksen alaisena. Suomessa maaperä on yleensä normaali- tai ylikonsolidoitunutta.

Esikonsolidaatiojännitys määritetään laboratoriossa yleensä ödometrikokeella. Esikonsolidaatiojännityksen ratkaisemiseksi on olemassa useita erilaisia menetelmiä muun muassa -Casagrande 1936, Ohde 1949, Kotzias 1963, van Zelst 1948-. Tässä työssä menetelmistä käydään kuitenkin läpi tarkemmin vain Kotziaksen menetelmä ja Ohden potenssifunktioon perustuva menetelmä. Menetelmien lisäksi esikonsolidaatiojännitystä voidaan arvioida esimerkiksi puolilogaritmisesta  $\ln \sigma_1$ -v kuvaajasta.

Niin kutsuttu **HUT-menetelmä** (Aalto et al. 2003) perustuu painumalaskelmissa käytettävään Janbun tangenttimoduulimenetelmään tai oikeammin sanottuna tangenttimoduulikäsitteeseen (Janbu 1967). Käsitteessä Janbu käyttää Ohden vuonna 1949 esittämää muodonmuutoksen ja kuormituksen välistä yhteyttä (kaava 2.9).

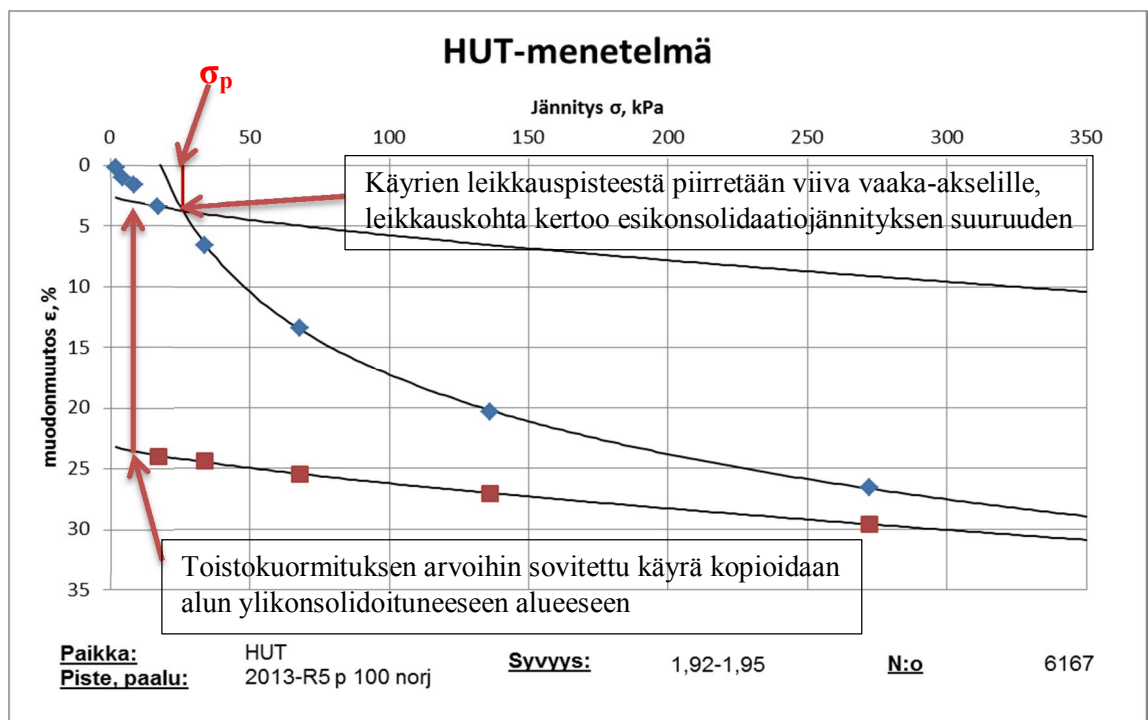
$$\varepsilon = \frac{1}{m\beta} \left( \frac{\sigma}{\sigma_v} \right)^\beta + C \quad (2.9)$$

missä  $\varepsilon$  on muodonmuutos [%]



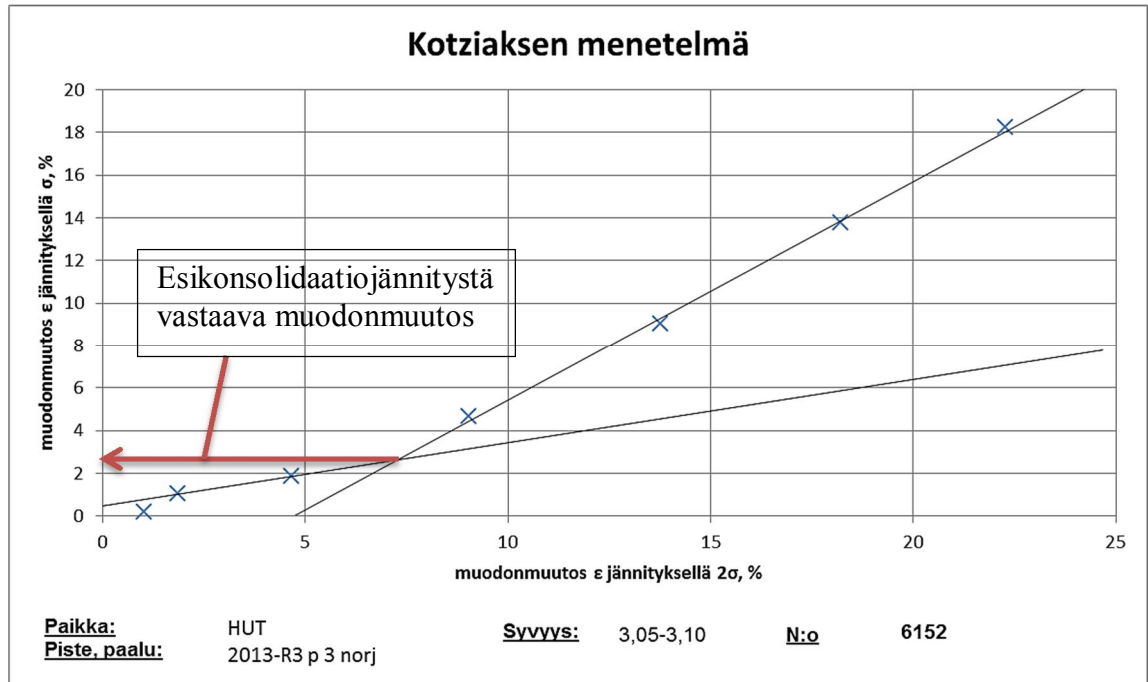
$m$	moduuliluku [-]
$\beta$	jännityseksponentti [-]
$\sigma$	jännitys [kPa]
$\sigma_v$	vertailujännitys 100 kPa
$C$	vakio [-]

HUT-menetelmässä etsitään muodonmuutoksella suhteutetun pienimmän neliösumman menetelmällä moduuliluvun, jännityseksponentin ja vakion arvot, joilla kaavalla 2.9 lasketut arvot vastaavat parhaiten portaittaisesta ödometrikokeesta saatuja jännitys-muodonmuutoshavaintoja. Muodonmuutoksen laskemiseen portaittaisesta ödometrikokeesta käytetään Taylorin menetelmällä (kappale 2.3.2) saatua primääripainuman loppuarvoa. Moduuliluvun, jännityseksponentin ja vakion arvot ratkaistaan erikseen yli- ja normaalikonsolidoituneelle alueelle. Ylikonsolidoituneen alueen arvot määritetään mieluiten toistokuormituksesta, mikäli se on tehty. Tämän jälkeen ylikonsolidoituneelle alueelle kaavalla 2.9 laskettu jännitys-muodonmuutos käyrä sovitetaan portaittaisen ödometrikokeen viimeiseen ylikonsolidoituneeseen pisteeseen ja normaalikonsolidoituneen alueen pisteisiin sovitetaan oma kaavan 2.9 mukainen käyrä. Käyrien leikkauspisteestä piirretään pystysuora viiva, joka leikkaa jännitys akselin esikonsolidaatiojännityksen kohdalta jolloin pysty akselilta saadaan tätä vastaava muodonmuutos (kuva 2.2).



Kuva 2.8. Esikonsolidaatiojännityksen määrittäminen HUT-menetelmällä. Siniset havaintopisteet ovat ensikuormituksen havaintopisteitä ja punaiset toistokuormituksen havaintopisteitä. Punainen pystyviiva osoittaa esikonsolidaatiojännityksen kohtaa.

**Kotziaksen menetelmässä** (Kotzias 1963) havaintopisteet esitetään kuvan 2.9 mukaisessa koordinaatistossa. Havaintopisteet asettuvat yleensä niin, että ylikonsolidoituneen alueen pisteet voidaan sovittaa suoralle ja normaalikonsolidoituneen alueen pisteet omalle suoralleen. Näiden suorien leikkauspisteestä voidaan pysty akselilta lukea esikonsolidaatiojännitystä vastaava muodonmuutos, jonka avulla voidaan jännitys-muodonmuutos kuvaajasta määrittää esikonsolidaatiojännitys. Kotziaksen menetelmä ei vaadi juuri tuplakuormitussuhdetta, vaan sitä voidaan käyttää, kunhan kuormitussuhde pysyy samana..



Kuva 2.9. Esikonsolidaatiojännityksen määrittäminen Kotziaksen menetelmällä

## 2.4 Saven lujuus- ja muodonmuutoskäyttäytyminen

Saven lujuutta ja käyttäytymistä erilaisissa jännitystiloissa kuvaamaan on kehitetty monia erilaisia materiaalmalleja. Osa malleista on hyvinkin yksinkertaisia kun taas osa malleista on monimutkaisia ottaen huomioon esimerkiksi materiaalin myötölujenemisen, jännityshistorian ja muodonmuutokset. Eri mallien lisäksi on myös olemassa useita eri suureita kuvaamaan lujuutta ja jännityksiä ja useita eri kokeita näiden määrittämiseksi. Lujuutta kuvaamaan tässä työssä käytetään yleisesti koheesiota  $c$  ja kitkakulmaa  $\varphi$  ja näiden tehokkaita muotoja.

Tämä työ keskittyy lähinnä portaittaisten ödometri- ja kolmiakσιαalikokeiden ympärille, joten jännityksiä kuvataan yleensä jännitysinvariantteilla (kaavat 2.34 ja 2.35). Invariantteja käytetään, sillä ne ovat tarkasteltavasta jännitysavaruuudesta riippumattomia. Invarianttien avulla pystytään esittämään muun muassa saven murtotila yksinkertaistettuna. Kaavoissa 2.34 ja 2.35 esitetyt jännitysinvariantit pätevät aksisymmetrisessä kuormituksessa, kuten kolmiakσιαalikokeessa (Laaksonen & Lojander, 1985).

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + 2\sigma'_3), \quad (2.34)$$

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2.35)$$

missä  $p'$  on tehokas hydrostaattinen jännitys [kPa]  
 $\sigma'_1$  tehokas pystysuuntainen jännitys [kPa]  
 $\sigma'_3$  tehokas vaakasuuntainen jännitys ( $\sigma'_2 = \sigma'_3$ ) [kPa]  
 $q$  deviatorinen jännitys [kPa]

Vastaavasti muodonmuutosta kuvataan muodonmuutosinvariantteilla, jotka jännitysinvarianttien  $p'$  ja  $q$  tapaan pätevät aksisymmetrisessä tapauksessa.

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad (2.36)$$

$$\varepsilon_s = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \quad (2.37)$$

missä $\varepsilon_v$	on tilavuuden muodonmuutos [%]
$V$	tilavuus [ $\text{m}^3$ ]
$\varepsilon_1$	pystysuuntainen muodonmuutos [%]
$\varepsilon_3$	vaakasuuntainen muodonmuutos [%]
$\varepsilon_s$	leikkausmuodonmuutos [%]

Materiaalimallien yhteydessä puhutaan usein myötöpinnasta. Myötöpinta on rajaviiva, joka erottaa kimmoisen ja plastisen muodonmuutoksen ja laajenee tilavuuden pienetessä. Myötöpinta kuvataan usein p'q-koordinaatistossa. Kun näytteen jännitystila on myötöpinnan sisällä, oletetaan usein tapahtuvan kimmoisia eli palautuvia muodonmuutoksia. Kun taas jännitystila siirtyy myötöpinnan ulkopuolelle, oletetaan tapahtuvan plastisia eli palautumattomia muodonmuutoksia, eli myötäämistä. Myötöpinnan suuruuteen vaikuttaa näytteen kuormitushistoria. Joissakin malleissa otetaan myös huomioon myötölujittuminen. Siinä jännitystilan siirtyessä myötöpinnan ulkopuolelle kuormituksella, joka ei kuitenkaan aiheuta murtumista, myötöpinta laajenee ja näytteen lujuus kasvaa.

Myötöpinnan ohessa puhutaan usein plastisesta potentiaalista, joka on jännitystilasta riippuva skalaarifunktio, jota vastaan muodonmuutosinkrementit ovat kohtisuorassa. Puhuttaessa assosiatiiivisesta myötösäännöstä, tarkoitetaan että myötöpinta ja plastinen potentiaali ovat sama asia, jolloin muodonmuutosinkrementit ovat kohtisuorassa myös myötöpintaan nähden. Plastisuusteorian mukaan näytteen jännitystilan saavuttaessa myötöpinnan alkaa plastista muodonmuutoksia tapahtua. (Laaksonen & Lojander, 1985).

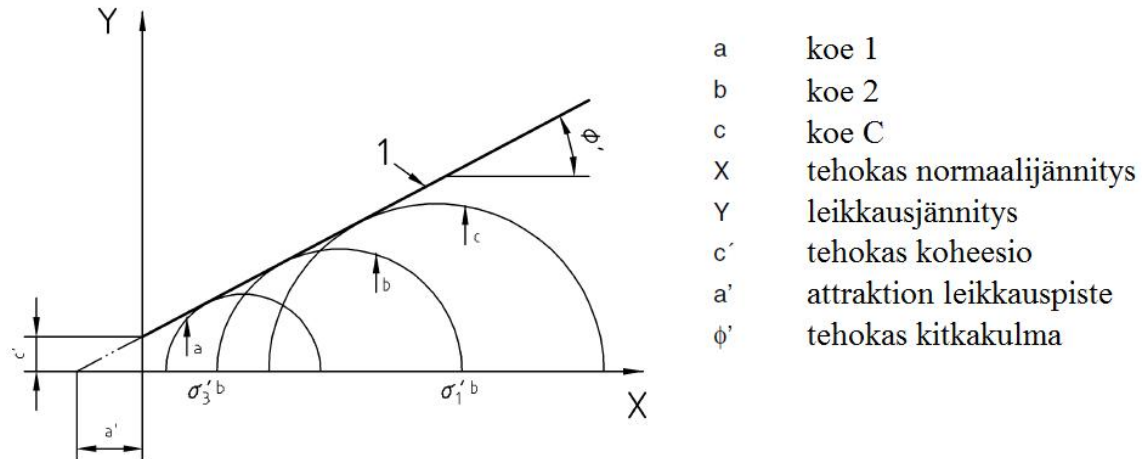
Monet materiaalimallit on kehitetty tutkien rakennettuja näytteitä. Rakennetulla näytteellä tarkoitetaan esimerkiksi savijauheesta ja vedestä sekoittamalla saatua näytettä tai luonnontilaisesta näytteestä sekoittamalla saatua. Rakennetut näytteet ovat usein tasalaatuisempia kuin luonnontilaiset, mutta voivat olla esimerkiksi huonon sekoittamisen johdosta kyllästymättömiä.

**Mohr-Coulombin murtoehto** on yksi tunnetuimmista materiaalin lujuutta kuvaavista ehdoista. Ehto on hyvin pelkistetty ja sopii käytännössä vain hauraille materiaaleille kuten betonille, mutta voidaan käyttää kuvaamaan esimerkiksi kuivakuori saven lujuutta. Kuitenkin ehdon yksinkertaisuuden ja lähtötietojen puutteen takia ehtoa käytetään paljon useammin. Murtoehto yleisesti tunnetussa muodossa on esitetty kaavassa 2.38 ja deviatorisen jännityksen suhteen kaavassa 2.39, joka pätee vain aksisymmetrisessä tapauksessa. CENin teknisen spesifikaation (CEN ISO/TS 17892-9, 2007) mukainen parametrimäärittäminen Mohr-Coulombin murtoehdolla on esitetty kuvassa 2.10. Kuvassa on piirretty Mohrin-ympyrät kolmesta eri kokeesta, näille ympyröille piirretään kaikkia koskettava tangentti, joka on Mohr-Coulombin murtosuora. Käytettäessä Mohr-Coulomb-materiaalimallia muodonmuutokset lasketaan yleensä ideaalikimmoplastisina. Tällöin kaikkien muodonmuutoksien ennen murtoa oletetaan olevan kimmoisia. Kun jännitys saavuttaa murtoehdon, kaikki muodonmuutokset oletetaan plastisiksi (kuva 2.11).

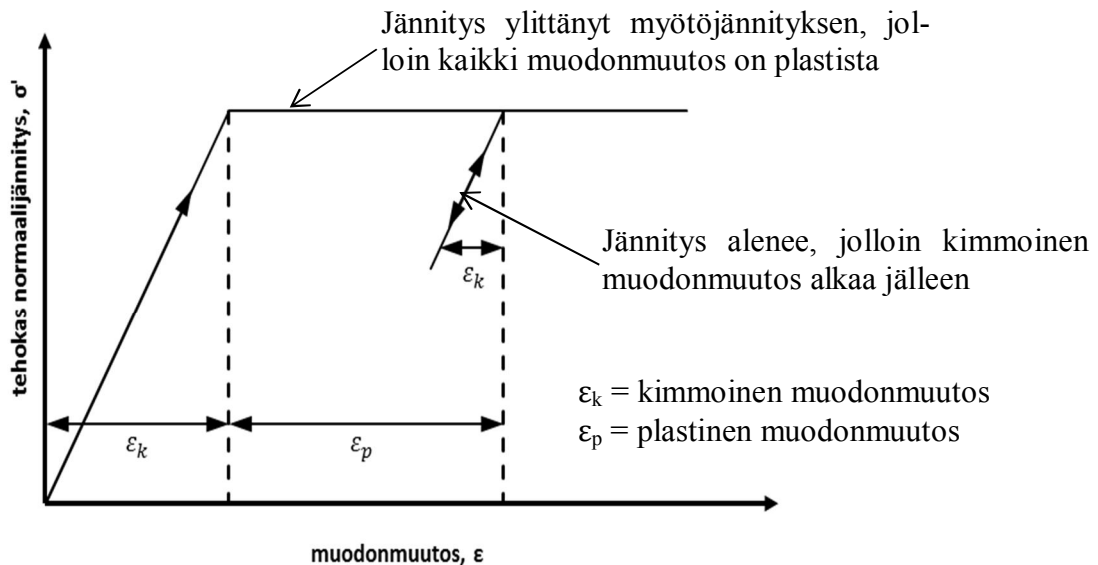
$$\tau' = c' + \sigma'_1 \tan \varphi' \quad (2.38)$$

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 = 2c' \cos \varphi' + (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \varphi' \quad (2.39)$$

missä  $\tau'$  on tehokas leikkauslujuus [kPa]  
 $c'$  tehokas koheesio [kPa]  
 $\varphi'$  tehokas kitkakulma/leikkauskestävyyskulma [°]



Kuva 2.10. Parametrien määrittäminen kolmiakselialikoesarjasta Mohr-Coulombin murtoehdon mukaisesti (CEN ISO/TS 17892-9, 2007).



Kuva 2.11. Ideaalikimmoplastisen materiaalin periaate

## 2.5 Kriittisen tilan käsite

Kriittisen tilan käsite on yksi tunnetuimmista maamekaniikan käsitteistä. Käsite julkaistiin ensimmäistä kertaa vuonna 1958 (Roscoe, Schofield & Wroth 1958). Vuonna 1968 julkaistiin klassinen kriittistä tilaa käsittelevä kirja (Schofield & Wroth 1968), johon oli aiempaan julkaisuun nähden lisätty käsitteitä plastisuudesta. Leikkausmuodonmuutosten kasvaessa jännityssuhde ( $\eta = q/p'$ ) lähestyvät vakioarvoa ( $\eta \rightarrow M$ ) ja tilavuudenmuutos lähestyy nollaa ( $\Delta e = \Delta v \rightarrow 0$ ) (kuva 2.12). Nämä kriittisen tilan ehdot voidaan esittää kaavan 2.40 mukaisesti (Wood, 1990). Maa-aineksen huokoslukua kriittisessä tilassa kutsutaan kriittisen tilan huokosluvuksi.

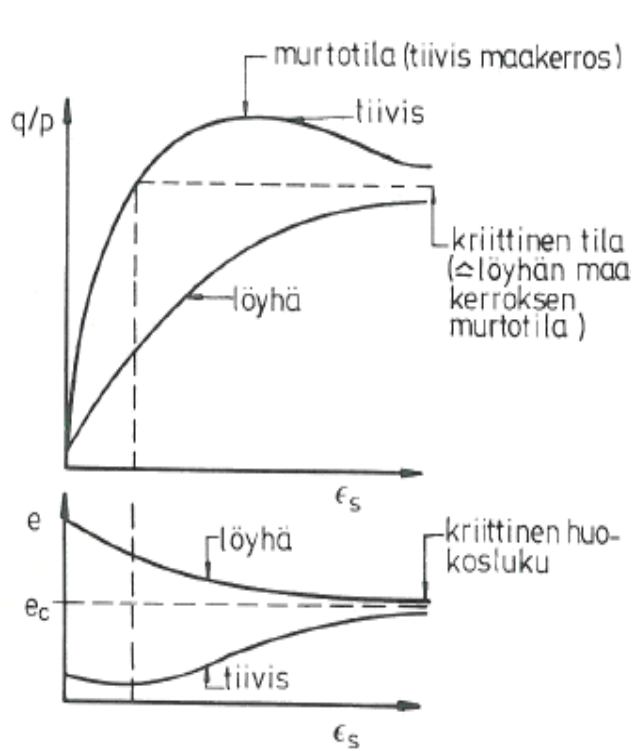
$$\frac{\partial p'}{\partial \epsilon_s} = \frac{\partial q}{\partial \epsilon_s} = \frac{\partial v}{\partial \epsilon_s} = 0 \quad (2.40)$$

Kriittinen tila esitetään yleensä suorana, eli kriittisen tilan suorana, kahdessa eri koordinaatistossa. Kaava 2.41 esitetään  $p'$ - $q$  -koordinaatistossa ja kaava 2.42  $\ln p'$ - $v$  -koordinaatistossa (kuva 2.13).

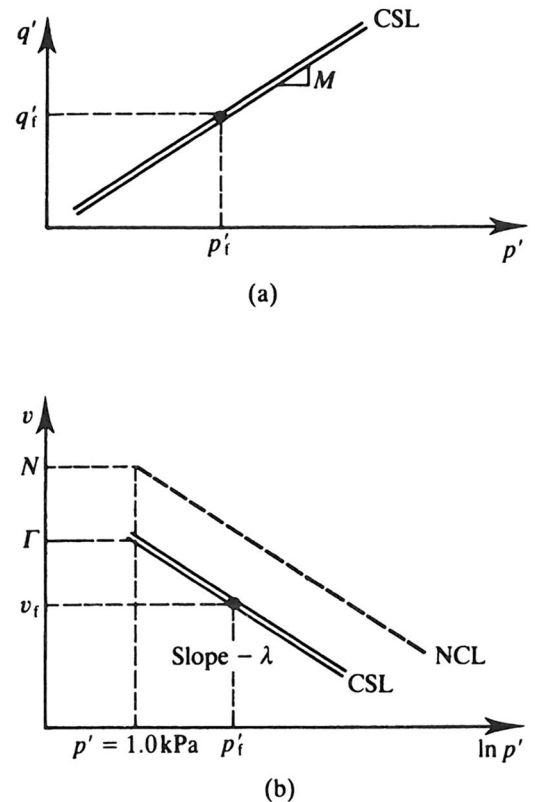
$$q = Mp' \quad (2.41)$$

$$v = \Gamma - \lambda \ln p' \quad (2.42)$$

missä  $M$  on kriittisen tilan jännityssuhde [-]  
 $\Gamma$  ominaistilavuus kriittisessä tilassa jännityksessä  $p'=1$  [-]  
 $\lambda$  normaalikonsolidoituneen alueen kokoonpuristuvuusindeksi [-]



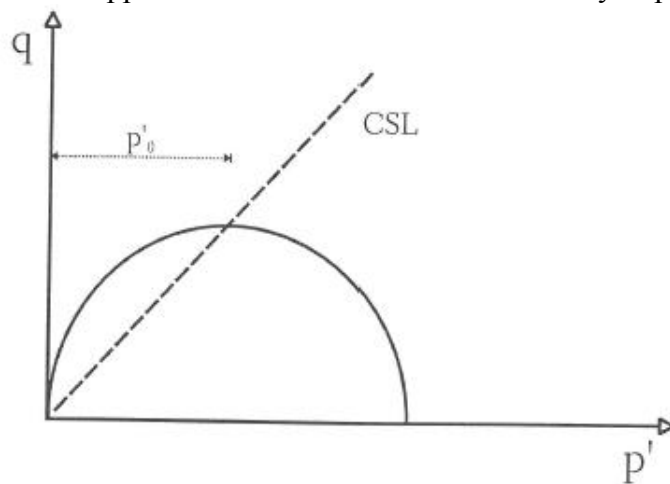
Kuva 2.12. Kriittisen tilan määritelmä (Laaksonen & Lojander, 1985)



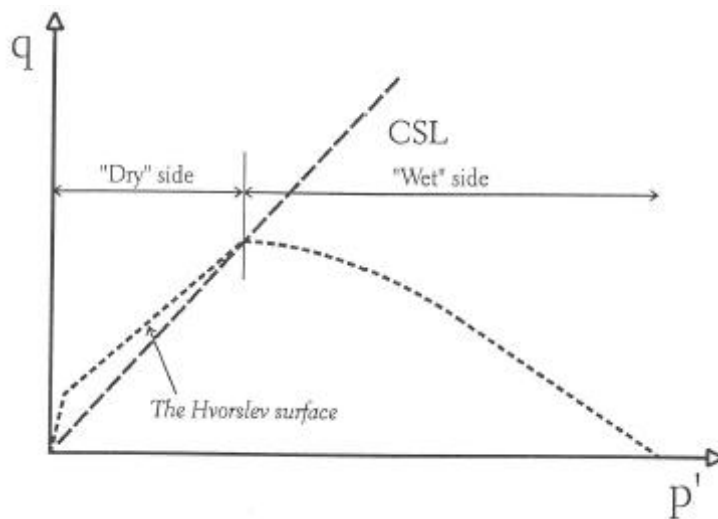
Kuva 2.13. Kriittisen tilan viivat (Atkinson 2007)

Kriittisen tilan käsitteen pohjalta on esitetty monia erilaisia maan käyttäytymistä kuvaavia malleja, eli materiaalimalleja. Näistä kuuluisin lienee Modified Cam-Clay model (Roscoe & Burland 1968). Modified Cam-Clay model eli MCCM on kehitetty tutkinnalla rakennettuja savinäytteitä, josta johtuen malli ei esimerkiksi ota ollenkaan huomioon luonnontilaisessa näytteessä yleensä vallitsevaa anisotropiaa. Malliin on esitetty myöhemmin useita parannusehdotuksia kuten Schofield 1980, joka yhdisti Cam-Clayn myötöpinnan (kuva 2.14) ja Hvorslevin pinnan (kuva 2.15). Hvorslevin pinta  $p'$ - $q$ -koordinaatistossa on rajaviiva (murtosuora), joka kuvaa todellisuutta alueellaan Cam-Clayn myötöpintaa paremmin. Vuosina 1986 ja 1987 esiteltiin käännetyn ellipsin muotoinen myötöpinta (kuva 2.16), jonka käänkökulma riippuu anisotropiatekijästä (Dafalias

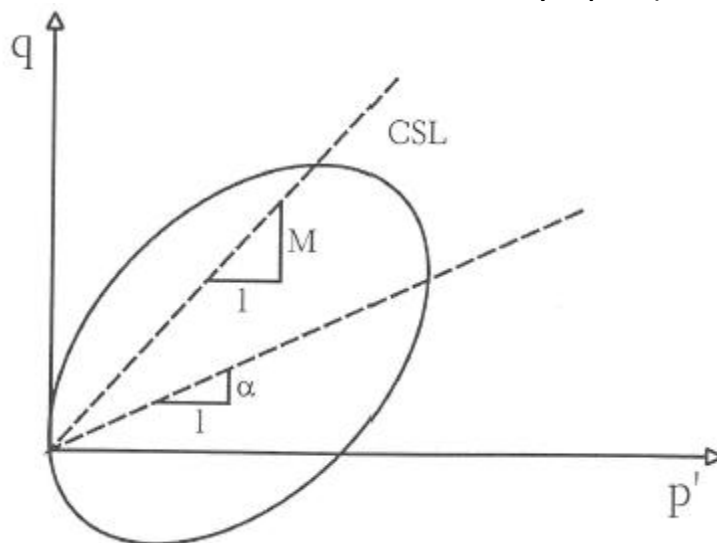
1986 ja 1987, Korhonen & Lojander 1987). Tämä myötöpinta on samanlainen seuraavassa kappaleessa käsiteltävän MAC-mallin myötöpinnan kanssa.



Kuva 2.14. Modified Cam-Clay mallin myötöpinta (Toivanen, T-L. 1999)



Kuva 2.15. Schofieldin vuonna 1980 ehdottama myötöpinta (Toivanen, T-L. 1999)



Kuva 2.16. Dafaliaksen vuonna 1986 esittelemä myötöpinta (Toivanen, T-L. 1999)

### 2.5.1 MAC-malli

MAC on lyhenne sanoista Mechanical Model for Anisotropic Clay. MAC on pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa kehitetty anisotrooppisen saven mekaaninen malli Suomen geologisia olosuhteita varten (Korhonen & Lojander 1988). Malli on muunnos kriittisen tilan mallista (Schofield & Wroth 1968) ja kokoelma muita hyväksi havaittuja teorioita.

MAC-malli on elastoplastinen, myötölujuuneva ja assosiatiivinen. Mallin parametreista suurin osa on klassisia maamekaniikan parametreja ja yhtälöt on kirjoitettu kriittisen tilan mallin jännitysinvarianttien ja symbolien avulla. Mallin rakenne on esitetty taulukossa 2.1, keskeiset merkinnät kuvassa 2.17 ja keskeiset mallissa käytettävät yhtälöt taulukossa 2.2. Täydellinen lista yhtälöistä on esitetty alkuperäisessä julkaisussa, Korhonen & Lojander 1988.

Malli soveltuu käytettäväksi vaativienkin maa- ja pohjarakenteiden geoteknisessä suunnittelussa ja sen avulla voidaan määrittää klassisia maaparametreja. Mallin konstitutiivisilla yhtälöillä voidaan laskea staattisten jännitysten, muodonmuutosten ja ajan välisiä riippuvuuksia, jossa muodonmuutokset voivat olla sekä elastisia että plastisia. Malli soveltuu myös murtotilojen analysointiin. (Lojander 1989.)

**Taulukko 2.1. Saven mekaanisen mallin rakenne MAC-mallissa (Korhonen & Lojander 1988).**

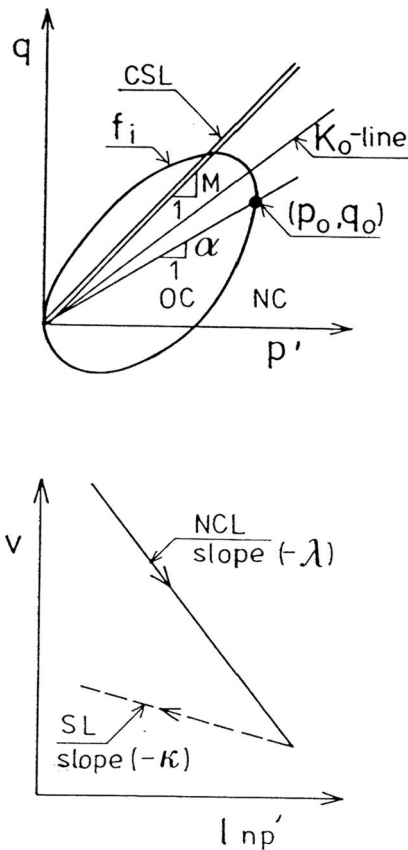
1. EMPIIRISET PERUSTEET Savikerroksen rakenne Savikerroksen varaan perustettujen rakenteiden ja savinäytteiden havaittu mekaaninen käyttäytyminen	2. REOLOGIA Savikerroksen jännityshistoria Kuormitusnopeuden vaikutus Konsolidaatio Sekundääripainuma
3. ELASTISUUS Hooken elastisuus Kokonaismuodonmuutokset Elastinen dilataatio* Hyperelastisuus	4. PLASTISUUS Myötö Plastinen dilataatio* Normaalisuus Myötölujueneminen Murto
5. PARAMETRIT Klassiset ja uudet parametrit Parametrien määrittäminen maastossa ja laboratoriossa Suunnittelussa sovellettavien parametrien arviointi	6. LASKELMAT MAC:n käyttö geoteknisessä suunnittelussa Käsilaskenta Numeeriset menetelmät

\*Dilataatiolla tarkoitetaan tilavuudenmuodonmuutosta, joka johtuu pääasiassa leikkausjännityksestä

**Taulukko 2.2, MAC-mallin keskeisimmät yhtälöt, joista kaavat 1-6 ovat empiirisiä yhtälöitä ja 7-11 teoreettisia (Korhonen & Lojander 1988).**

SOVELLUS / NIMITYS		YHTÄLÖ	Taulukko2.2 kaava no
Hyperbelimalli, Muodonmuutokset suljetussa tilassa		$\Delta q_u = \frac{\varepsilon_{su}}{a + b\varepsilon_{su}}$	1
Ominaisilavuudenmuutokset kriittisessä tilassa		$v = \Gamma - \lambda \ln p'$	2
Elastiset ominaisilavuudenmuutokset		$v = v_\kappa - \kappa \ln p'$	3
Kriittinen tila, Normaalisti konsolidoituneen saven murto		$q = Mp'$	4
Ylikonsolidoituneen saven murtoehto		$\tau' = c' + \sigma_1' \tan \varphi'$	5
Myötöfunktio (ellipsi)		$q^2 + \frac{p'}{p_0}(q_0^2 - 2qq_0) = M^2(p_0 - p')p'$	6a
Anisotropia-parametri		$\alpha = q_0/p_0$	6b
Myötösääntö		$d\varepsilon_{ij}^p = d\Delta \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}$	7
Assosiatiivisuusehto		$g \equiv f$	8a
Normaalisuus-sääntö		$dq/dp = -d\varepsilon_v^p/d\varepsilon_s^p$	8b
Konsistenssiyhtälö		$f = 0 \quad df = 0$	9
Plastinen moduuli		$H = \frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} p_0 p^2 \left[ 1 - \left( \frac{\eta}{M} \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( \frac{\alpha}{M} \right)^2 \right]$	10
Isotrooppinen myötölujittumislaki		$dp_0 = \frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} p_0 d\varepsilon_v^p$	11a
Deviatorinen myötölujittumislaki		$dq_0 = \frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} p_0 \left[ M^2 - \left( \frac{q}{p} \right)^2 \right] d\varepsilon_s^p$	11b
missä	a	on hyperbelimallin parametrit [%/kPa]	
	b	hyperbelimallin parametrit [1/kPa]	
	$\kappa$	elastinen tilavuudenmuutosparametri [-]	
	f	myötöfunktio [-]	
	g	plastinen potentiaalfunktio [-]	
	alaindeksit		
	s	leikkaus-	
	u	suljettutila	
	v	tilavuus-	
	0	alkutila/luonnontila	
	yläindeksi		
	p	plastinen	





Kuva 2.17. MAC-mallin merkinnät (Lojander 1989)

### TRIAXIAL TEST

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + 2\sigma'_3) \text{ Hydrostatic stress}$$

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \text{ deviatoric stress}$$

$$\eta = q/p' \text{ stress ratio}$$

$$\alpha = q_o/p'_o \text{ anisotropy parameter}$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \text{ volumetric strain}$$

$$\varepsilon_s = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \text{ shear strain}$$

$$\psi = d\varepsilon_v^p/d\varepsilon_s^p \text{ dilatation angle}$$

NC = normally consolidated

OC = over consolidated

NCL = normal consolidation line

SL = swelling line

CSL critical state line

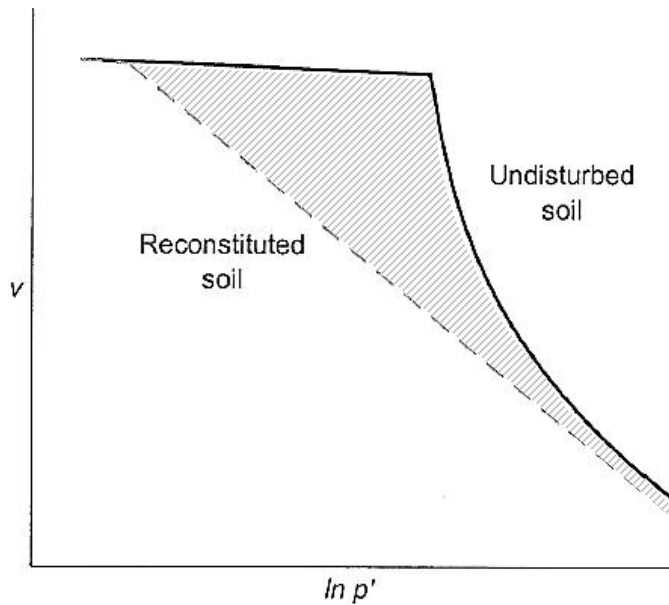
$f_i$  = initial yield surface

### 2.5.2 S-CLAY1S

Osana Suomen akatemian rahoittamaa hanketta ”Modelling the mechanical behaviour of naturally anisotropic soft soils” ja yhteistyössä Glasgown yliopiston kanssa Teknillisessä korkeakoulussa kehitettiin uusi anisotrooppinen elastoplastinen maamalli S-CLAY1. Malli on tarkoitettu pehmeille, normaali- tai hieman ylikonsolidoituneille saviille. Mallin ja testidatan vertailun jälkeen todettiin kuitenkin, että malliin tarvittiin parannuksia. S-CLAY1:n kehittäjä Wheeler ehdottikin S-CLAY1S-mallia (aikaisemmin SS-CLAY1) (Wheeler 2000), joka ottaisi myös huomioon myös maan rakenteellisen lujuuden. S-CLAY1S malli on olemassa epäkaupallisena versiona Plaxis-laskentaohjelmistolle. (Koskinen 2001)

Luonnontilaisesta, häiriintymättömästä (undisturbed soil) maasta voidaan usein havaita jonkinasteinen yleensä kennomainen rakenne. Rakenteella tarkoitetaan maarakeiden järjestäytymistä maassa ja rakeiden välisiä sähköisiä ja kemiallisia voimia, jota kutsutaan yhdessä adheesioksi. Maarakeitten järjestäytyminen rakenteeksi vie paljon aikaa, ei sitä pysty muodostumaan rakennettuihin näytteisiin (reconstituted soil) (kuva 2.18). Kun näytettä kuormitetaan, siinä tapahtuvien muodonmuutoksien oletetaan olevan kimmoisia, mikäli jännitykset pysyvät myötöpinnan sisäpuolella. Kun jännitykset ylittävät myötöpinnan, alkaa tapahtua plastisia muodonmuutoksia. Plastisten muodonmuutosten takia maarakeet liikkuvat palautumattomasti toisiinsa nähden. Tällöin rakeiden muodostama rakenne rikkoutuu ja rakeiden välille ajan saatossa syntyneet vetovoimat katkeavat. Tämä näkyy kuvasta 2.18, jossa rakennetun näytteen ominaistilavuus alkaa pienetä heti, mutta häiriintymättömän näytteen ominaistilavuus alkaa pienetä rakenteellisesta lujuudesta johtuen (suurempi myötöpinta) vasta myöhemmin. Kun jännitystaso kasvaa, häiriintymättömässä maassa maarakeiden muodostavat rakenteet tuhoutuvat ja

rakeiden väliset vetovoimat katkeavat, jolloin ominaistilavuus lähestyy rakennetun näytteen ominaistilavuutta. (Koskinen 2001)



Kuva 2.18. Rakennetun ja häiriintymättömän maan käyttäytyminen kuormituksessa (Koskinen 2001)

S-CLAY1S:n häiriintymättömän maan myötöfunktio on muotoa

$$f = (q - \alpha p')^2 - (M^2 - \alpha^2)(p'_m - p')p' = 0 \quad (2.43)$$

Kuten edellä todettiin, häiriintyneellä maalla (esim. rakennetulla näytteellä) ei ole rakenteellista lujuutta, joten se alkaa myödetä ennen häiriintymätöntä maata (kuva 2.18). Tästä johtuen häiriintyneen maan myötöpinnan voidaan olettaa olevan pienempi, mutta yksinkertaisuuden vuoksi samanmuotoinen kuin häiriintymättömän maan myötöpinnan. Kaavassa 2.43 myötöpinnan laajuutta säätelee termi  $p'_m$ , häiriintyneen maan myötöfunktiossa kyseinen termi korvataan termillä  $p'_{mi}$ , jossa i tulee sanasta ”intrinsic” eli luontainen. Näiden kahden termin välillä vallitsee kaavan 2.44 mukainen yhteys, jota varten esitellään uusi parametri  $x$ , joka kuvaa myötöpintojen laajuuden erotusta (kuva 2.19).

$$p'_m = (1 + x)p'_{mi} \quad (2.44)$$

jossa  $p'_m$  on myötöpinnan vaakasuuntainen ääriarvo  
 $p'_{mi}$  initiaalinen myötöpinnan vaakasuuntainen ääriarvo



Häiriintymättömän maan myötölujittumislaki ilmaistaan yhtälöllä 2.49

$$dp'_m = p'_{mi} dx + dp'_{mi}(1 + x + dx) \quad (2.49)$$

S-CLAY1S-mallissa on oletettu assosiatiivinen myötöehto, josta seuraa

$$\frac{d\varepsilon_s^p}{d\varepsilon_v^p} = \frac{2(\eta - \alpha)}{M^2 - \eta^2} \quad (2.50)$$

Konsistenssiyhtälö voidaan ilmaista kaavalla 2.51

$$\frac{\partial f}{\partial p'} dp' + \frac{\partial f}{\partial q} dq + \frac{\partial f}{\partial p'_{mi}} dp'_{mi} + \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial \alpha} d\alpha = 0 \quad (2.51)$$

Plastiset muodonmuutokset kimmoplastisen teorian mukaan voidaan laskea kaavoilla 2.52 ja 2.53

$$d\varepsilon_v^p = \Lambda \frac{\partial g}{\partial p'} \quad (2.52)$$

$$d\varepsilon_s^p = \Lambda \frac{\partial g}{\partial q} \quad (2.53)$$

Yhdistämällä kaavat 2.46, 2.47, 2.51, 2.52 ja 2.53 saadaan

$$\Lambda = \frac{\frac{\partial f}{\partial p'} dp' + \frac{\partial f}{\partial q} dq}{H} \quad (2.54)$$

Jännitysinkrementtien ja plastisten muodonmuutosinkrementtien suhdetta kuvaavaksi plastiseksi moduuliksi saadaan

$$H = - \left[ \frac{\partial f}{\partial p'_{mi}} \frac{\partial p'_{mi}}{\partial \varepsilon_v^p} \frac{\partial f}{\partial p'} + \frac{\partial f}{\partial x} \left( \frac{\partial x}{\partial \varepsilon_v^p} \left| \frac{\partial f}{\partial p'} \right| + \frac{\partial x}{\partial \varepsilon_s^p} \left| \frac{\partial f}{\partial q} \right| \right) + \frac{\partial f}{\partial \alpha} \left( \frac{\partial \alpha}{\partial \varepsilon_v^p} \left\langle \frac{\partial f}{\partial p'} \right\rangle + \frac{\partial \alpha}{\partial \varepsilon_s^p} \left| \frac{\partial f}{\partial q} \right| \right) \right] \quad (2.55)$$

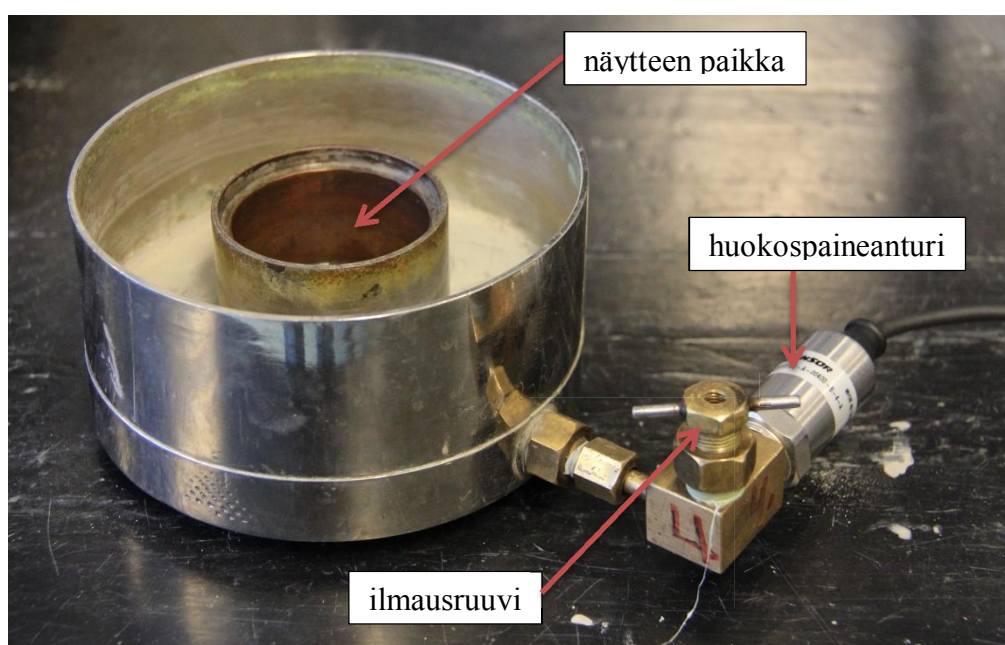
Plastisten muodonmuutosinkrementtien laskentakaavaksi saadaan

$$\begin{bmatrix} d\varepsilon_v^e \\ d\varepsilon_s^e \end{bmatrix} = \frac{1}{H} \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial p'} \frac{\partial f}{\partial p'} & \frac{\partial f}{\partial q} \frac{\partial f}{\partial p'} \\ \frac{\partial f}{\partial p'} \frac{\partial f}{\partial q} & \frac{\partial f}{\partial q} \frac{\partial f}{\partial q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dp' \\ dq \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

## 3 Laboriotekniikan kehittäminen

### 3.1 Huokospaineödometri

Työn aikana rakennettiin koeversio ödometrisellistä, josta pystyttiin mittaamaan näytteen pohjasta huokosvedenpainetta (kuva 3.1). Koska huokosvedenpainetta mitataan näytteen pohjasta, kuivaa näyte vain ylöspäin. Näyte muotoillaan oikean kokoiseksi normaalin ödometrikokeen irtorenkaalla. Selli täytetään vedellä, jonka jälkeen renkaassa oleva näyte lasketaan varovasti veden päälle. Sellin ja huokospaineanturin välissä oleva ilmastusruuvi avataan, jolloin vesi sellistä alkaa poistua ja näyte painua sellin sisään renkaasta. Koska mitataan huokospainetta, tulee sellin ilmastuksen kanssa olla erittäin huolellinen, on suositeltavaa käyttää selli vedellä täytettynä tyhjiössä ennen näytteen asentamista. Lisäksi käytettävät huokoskivet tulee käyttää tyhjiössä ja säilyttää veden alla.

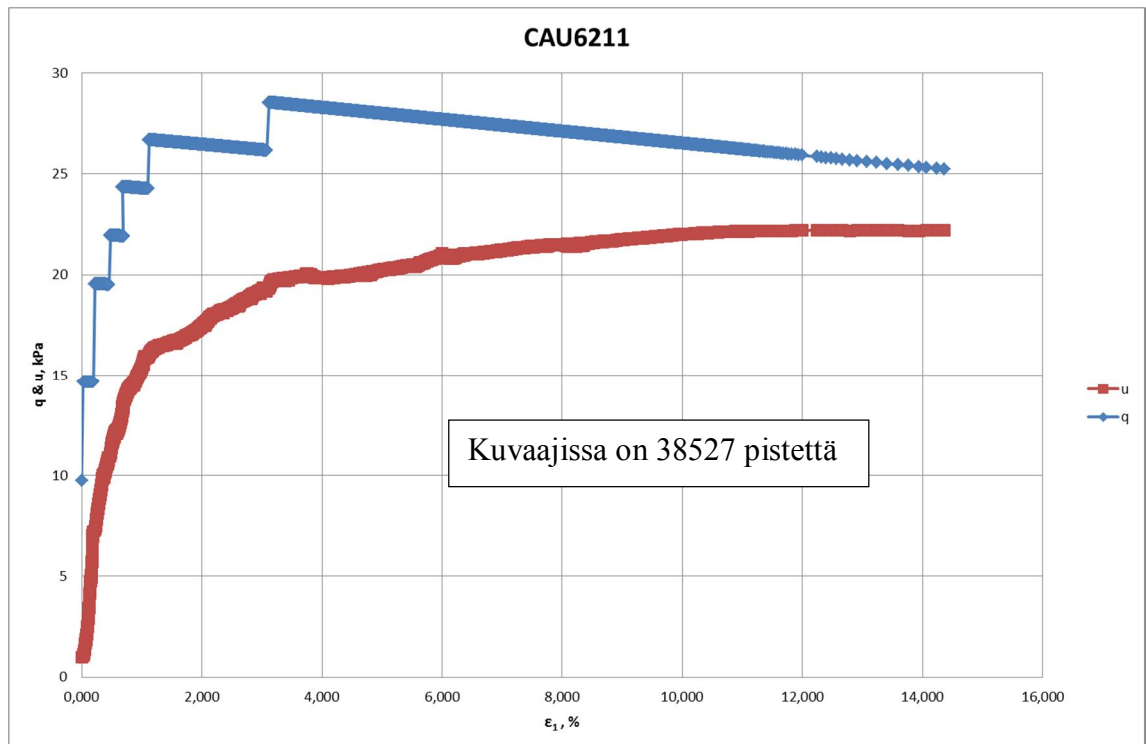


Kuva 3.1. Huokospaineödometri

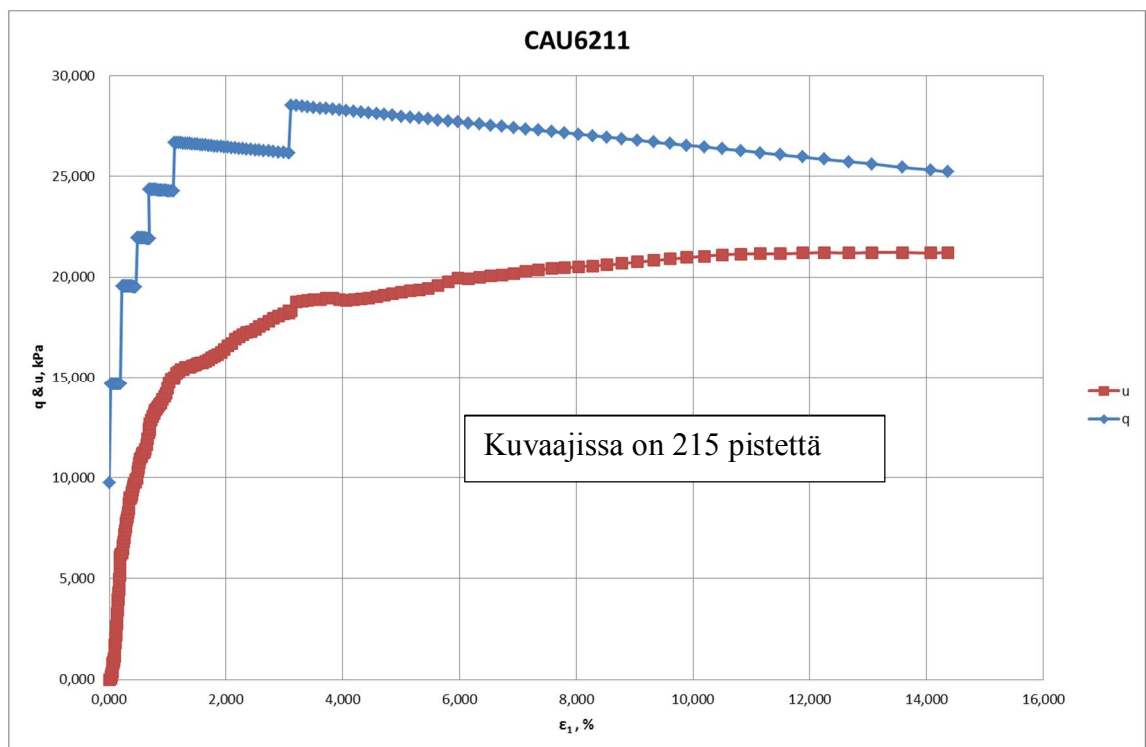
### 3.2 Mittaustiedon käsittely

Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa kolmiaksoalukokeissa on käytössä automaattinen tiedonkeruulaite. Laite kerää tiedot pystysuuntaisesta siirtymästä, näytteeseen vaikuttavasta pystysuuntaisesta voimasta, huokospaineesta ja tilavuuden muutoksesta. Laite on asetettu ottamaan lukemat tiedoista 20 sekunnin välein. Pitkissä kokeissa tämä tarkoittaa kymmeniä tuhansia rivejä Excelissä. Tällainen määrä rivejä aiheuttaa ongelmia kokeen käsittelyssä, varastoinnissa ja siirtämisessä suuren tiedostokonsa vuoksi. Työn aikana luotiin Excel-tiedosto, jolla pystytään karsimaan rivejä huomattavasti käytännöllisempään määrään. Mittaustiedon karsimisen periaatteena toimii haluttu prosentuaalinen muutosraja. Käyttäjä pystyy itse syöttämään haluamansa muodonmuutosrajan kaikille mitatuilla suureille, jokaisella suurella voi olla oma rajansa. Tiedosto alkaa verrata ensimmäisen mittaustietorivin suureita seuraavien rivien suuriin kunnes jonkin suureen muutos ylittää annetun raja-arvon. Tämän jälkeen tiedosto alkaa verrata seuraavia rivejä äsken raja-arvon ylittäneisiin taas niin kauan kunnes löytää suureen, joka ylittää raja-arvon. Tämä jatkuu niin kauan kunnes ollaan alkuperäisen mittausdatan lopussa. Tärkeää on, että tiedosto käsittelee jokaista suuretta yksilönä, tällöin suureen muutos on maksimissaan raja-arvo, mutta voi olla yleensä pienempikin.

Kuvissa 3.2 ja 3.3 on esitetty saman kolmiakσιαalikokeen kuvaaja suodattamattomalla koko rivimäärällä (kuva 3.2) joka koostuu 38527 pisteestä ja suodatetulla rivimäärällä (kuva 3.3) joka koostuu 215 pisteestä.



Kuva 3.2. Esimerkkikuva mittaustiedoista josta ei ole vähennetty pisteitä



Kuva 3.3. Esimerkkikuva mittaustiedoista josta on vähennetty pisteitä

### 3.3 Teknisen spesifikaation vaatimukset

Laboriotekniikan ja -laitteiston kehittämisessä otettiin huomioon myös CENin teknisten spesifikaatioiden vaatimukset ödometri- ja kolmiakσιαalikolaitteistoille. Spesifikaatioissa annetaan vaatimuksia työn suoritukselle, kolaitteistolle ja koetulosten raportoinnille. Liitteessä 1 on koottu kolmiakσιαalikokeita- ja ödometrikokeita koskevat vaatimukset ja tarkasteltu niitä pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorion kannalta. Pääosin voidaan sanoa vaatimuksien täyttyvän ja joihinkin epäkohtiin työ käytännössä on tehty muutoksia jo työn aikana. Suurimmat epäkohdat laboratoriossa liittyvät lämpötilakontrolliin ja kolaitteistojen kalibrointiin.

Myös muille laboratoriossa suoritettaville kokeille on julkaistu omat spesifikaationsa. Osa spesifikaatioista on julkaistu vain englanninkielisenä, suomenkielillä kommentoilla

- Vesipitoisuuden määrittäminen, suomeksi (CEN ISO/TS 17892-1, 2007)
- Hienorakeisen maan irtotiheyden määrittäminen, suomeksi (CEN ISO/TS 17892-2, 2007)
- Kiintotiheyden määrittäminen. Pyknometrinen menetelmä, suomeksi (CEN ISO/TS 17892-3, 2007)
- Rakeisuuden määrittäminen, suomeksi (CEN ISO/TS 17892-4, 2007)
- Incremental loading oedometer test ja sen soveltaminen Suomessa, englanniksi (CEN ISO/TS 17892-5, 2007)
- Kartiokoe, suomeksi (CEN ISO/TS 17892-6, 2007)
- Hienorakeisen maan yksiakσιαalinen puristuskoe, suomeksi (CEN ISO/TS 17892-7, 2007)
- Unconsolidated undrained triaxial test, englanniksi (CEN ISO/TS 17892-8, 2007)
- Consolidated triaxial compression tests on water saturated soils ja sen soveltaminen Suomessa, englanniksi (CEN ISO/TS 17892-9, 2007)
- Suorat leikkauskokeet, suomeksi (CEN ISO/TS 17892-10, 2007)
- Vedenläpäisevyyden määrittäminen. Vakiopaine- ja muuttuvapainekoe, suomeksi (CEN ISO/TS 17892-11, 2007)
- Konsistenssirajojen määrittäminen. Atterbergin rajat, suomeksi (CEN ISO/TS 17892-12, 2007)



## 4 HUT-Clay

### 4.1 Näytteenoton kuvaus

Työtä varten otettiin näytteitä keväällä ja syksyllä vuonna 2013. Näytteet on otettu Otaniemestä, aivan pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorion takaa (kuva 5.3). Häiriintymättömät näytteet on otettu norjalaisella mäntäkairalla (NGI 54) (kuva 5.4). CENin standardin mukaan norjalaisella mäntäkairalla pystytään ottamaan näytteitä näytteenottoluokassa A ja näin laboratoriolaatuluokan 1 mukaisia näytteitä (SFS-EN ISO 22475-1, 2006). Häiriintymättömien näytteiden ottaminen aloitettiin noin syvyydeltä 1,5 metriä maanpinnasta. Useimmista pisteistä otettiin vain yksi putki näytettä, noin syvyydeltä 1,5–2,2 metriä, mutta muutamasta pisteestä otettiin myös toinen putki noin syvyydeltä 2,3–3,0 metriä. Työn aikana tutkimus kuitenkin painottui lähinnä syvyyteen 1,5–2,2 metriä maanpinnasta. Lisäksi syksyllä 2013 otettiin pisteistä häiriintyneitä pussinäytteitä putkinäytteen aloitus­syvyyden yläpuolelta. Pussinäytteet otettiin avattaessa reikää kierrekairalla putkinäytteenottimelle.



Kuva 4.1. Näytteenottopaikan sijainti (Espoon kaupunki, 2014.)



Kuva 4.2. Norjalaistyyppinen näytteenotin (NGI 54) (alla) ja näyteputki (yllä)



## 4.2 Luokitusominaisuudet

Kaikista työn aikana käytetyistä näyteputkista on määritetty ainakin putken alapäästä seuraavat luokitusominaisuudet: väri, vesipitoisuus, märkätiheys, kiintotiheys, humuspitoisuus, kartiokokeella häiriintymätön leikkauslujuus, häiritty leikkauslujuus, sensitiivisyys ja juoksuraja, rakeisuus ja rakeisuudesta maalaji GEO- ja Eurokoodiluokituksen mukaisesti. Toisen näytteenoton yhteydessä otettiin myös pussinäytteitä maasta noin 20 cm välein. Kaikista pussinäytteistä määritettiin vesipitoisuus ja mahdollisuuksien mukaan kiintotiheys ja rakeisuus. Lisäksi ödometri- ja kolmiaksiaalikokeiden yhteydessä on määritetty märkätiheys ja vesipitoisuus näytteen ympäriltä olevasta aineksesta ja koenäytteen vesipitoisuus. Luokituskokeitten tulokset luokituskokeista (10 putki ja 8 pussinäytettä) ja ödometri- (11 kpl) ja kolmiaksiaalikokeista (15 kpl) on koottu kuviin 4.3–4.15. Luokituskokeitten tulokset on lisäksi koottu taulukkoon 4.1 ja ödometri- ja kolmiaksiaalikokeista määritetyt luokitusominaisuudet taulukkoon 4.2.

### Vesipitoisuus

Näytteiden vesipitoisuus on määritetty CENin teknisen spesifikaation CEN ISO/TS 17892-1, 2007 mukaisesti. Ödometri- ja kolmiaksiaalikokeiden yhteydessä tehtiin aina kaksi vesipitoisuuden määrittystä. Koetta varten otettiin näyteputkesta hieman enemmän näytettä kuin mitä itse koe vaati, sillä näytteen päät usein häiriintyvät valmistelun aikana ja näyte on halkaisijaltaan suurempi kuin kokeessa käytettävä. Näytteen päistä leikatavista paloista ja reunoista jäävästä ylimääräisestä materiaalista määritettiin vesipitoisuus. Lisäksi näyte punnittiin ennen koetta, ja kokeen jälkeen näyte kuivattiin ja punnittiin, jolloin saatiin myös koenäytteen vesipitoisuus. Kokeessa käytetystä näytteestä jää aina hieman materiaalia koelaitteeseen, joten vesipitoisuuden määrittäminen on luultavasti hieman ylikanttiin.

Näytteistä määritetyt vesipitoisuudet on koottu taulukkoon 4.1 ja esitetty syvyyden suhteen kuvassa 4.3. Vesipitoisuuksien perusteella voidaan arvella pohjavedenpinnan olevan noin syvyydellä 0,6 metriä maanpinnasta. Työssä käsitellyt näytteet ovat pääosin syvyydeltä 1,5–2,2 metriä maanpinnasta. Tämä väli voidaan jakaa vesipitoisuuden osalta kahteen alueeseen. Suurimmassa osassa alueesta, maanpinnasta 1,7–2,2 metriä, vesipitoisuus on keskimäärin noin 73 %. Ylempänä syvyydellä 1,5–1,7 metriä maanpinnasta; vesipitoisuus nousee noin 90 %:iin. Hajonta on melko suurta, syvyydeltä 1,7–2,2 määritetyt vesipitoisuuden arvot vaihtelevat välillä 65–80 %. Tämä johtuu suurimmaksi osaksi maan epähomogeenisuudesta, vähän koetekniikasta sekä mahdollisesti myös näytteen iästä. Työtä varten otettiin näytteitä myös noin 3 metrin syvyydeltä maanpinnasta, jossa vesipitoisuus kokeiden perusteella on noin 50 %. Pussinäytteistä määritetyistä vesipitoisuuksista voidaan arvioida vesipitoisuuden olevan noin 35 % pohjavedenpinnan alapuolella ja syvyydellä 0,6–1,3 metriä maanpinnasta noin 70 %. kuvassa 4.3 näkyy noin syvyydellä 1,2–1,3 kaksi poikkeavaa havaintoa. Nämä havainnot ovat luultavasti virheellisiä, sillä näytteenoton aikana huomattiin ohut salaojakerros tällä syvyydellä. kierrekairalla ei saa onnistunutta näytettä karkearakeisesta maasta pohjavedenpinnan alapuolelta. Salaojakerros näkyy myös rakeisuusmäärittäksessä 4.13.

### Märkätiheys

Kuten vesipitoisuus myös märkätiheys määritetään luokitus-, ödometri- ja kolmiaksiaalikokeiden yhteydessä. Märkätiheys on luonnontilaisen näytteen painon suhde näytteen tilavuuteen, kaavan 4.1 mukaisesti

$$\rho_m = \frac{m_m}{V} \quad (4.1)$$

missä  $\rho_m$  on näytteen märkätiheys [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]  
 $m_m$  määrän näytteen massa [g]

Tässä työssä luokituskokeita tehdessä näyteputkesta otettiin 50 mm pitkä näyte, jonka halkaisija oli näyteputken sisähalkaisijan verran. Työn näytteet otettiin norjalaisella mäntäkairalla, jossa halkaisija on 54 mm ja pinta-ala  $2290 \text{ mm}^2$ . Tästä laskettiin näytteen tilavuus ja jakamalla punnitun näytteen massa tilavuudella saatiin märkätiheys. Märkätiheys laskettiin myös ödometri- ja kolmiaksaalikoenäytteistä.

Näytteistä määritetyt märkätiheydet on koottu taulukkoon 4.1 ja esitetty syvyyden suhteen kuvassa 4.4. Syvyydellä maanpinnasta n. 1,6–2,2 m, märkätiheyden arvot vaihtelevat välillä 1,5–1,63 ja keskimääräiseksi arvoksi määritettiin  $1,57 \text{ g}/\text{cm}^3$ . Luokituskokeissa tehty märkätiheyden määritykset ovat epätarkimpia, sillä näytteen pituus on mitattu käsin 1 mm tarkkuudella. Näyte myös leikataan käsin näyteputken päätä vasten, joka voi olla vahingoittunut vaikuttaen mahdollisesti leikkauspintaan ja ulostyöntyvän näytteen halkaisijaan.

### Kiintotiheys

Kiintotiheydellä  $\rho_s$  tarkoitetaan pelkkien rakeitten massa tilavuussuhdetta. Kiintotiheyden arvot määritettiin pyknometrikokeella CENin teknisen spesifikaation CEN ISO/TS 17892-3, 2007 mukaisesti. Määritetyt kiintotiheydet on koottu taulukkoon 4.1 ja esitetty syvyyden suhteen kuvassa 4.5. Kiintotiheyden arvot tutkitulla syvyydellä vaihtelevat välillä 2,75–2,82  $\text{g}/\text{cm}^3$  ja keskimääräiseksi arvoksi määritettiin  $2,78 \text{ g}/\text{cm}^3$ .

### Humuspitoisuus

Näytteen humuspitoisuus määritettiin polttokokeella Eurokoodi 7 osan 2 ja tämän kansallisen liitteen mukaisesti (SFS-EN 1997-2 + AC). Määritetyt humuspitoisuudet on koottu taulukkoon 4.1. Tutkitulla syvyydellä näytteissä ei havaittu humusta.

### Suljettu ja häiritty leikkauslujuus ja sensitiivisyys

Suljettu ja häiritty leikkauslujuus määritettiin luokituskokeita tehdessä kartiokokeella. Kartiokokeet häiriintymättömille ja häirityille näytteille suoritettiin CENin teknisen spesifikaation CEN ISO/TS 17892-6, 2007 mukaisesti. Sensitiivisyys laskettiin saatu-  
 jen suljetun ja häirityn leikkauslujuuden suhteena.

Määritetyt suljetun leikkauslujuuden arvot on koottu taulukkoon 4.1 ja esitetty syvyyden suhteen kuvassa 4.6. Vastaavasti häirityn leikkauslujuuden ja sensitiivisyyden arvot on koottu taulukkoon 4.1 ja esitetty syvyyden suhteen kuvissa 4.7 ja 4.8. Luokituskokeet on tehty, aivan näyteputkien alapäästä. Saadut suljetun leikkauslujuuden arvot noin syvyydeltä 2 metriä maanpinnasta hajaantuivat kahteen pistejoukkoon, toisen pisteparven keskiarvo on noin 9 kPa ja toisen noin 13 kPa. Mitään yksinkertaista selittävää tekijää jakautumiselle ei löydy esim. vesipitoisuuden vaihtelusta tai näytteenottoajankohdasta. Vaihtelu voi johtua maan epähomogeenisuudesta ja myös osaksi koetekniikasta, sillä kartion voi helposti jättää hieman liian korkealle tai upottaa hieman näytteeseen ennen vapautusta, joka johtaa virheeseen. Häirityn leikkauslujuuden arvot vaihtelivat välillä 1,1–1,5 ja keskiarvoksi määritettiin noin 1,3 kPa tutkitussa syvyydessä. Sensitiiv-

visyyden arvot vaihtelivat tutkitussa syvyydessä välillä 6-10 ja keskiarvoksi määritettiin noin 9.

### **Juoksu- ja kieritysrajat**

Luokituskokeita tehdessä juoksuraja on määritettiin jokaisesta näytteestä häirityn kartiokokeen avulla CENin teknisen spesifikaation CEN ISO/TS 17892-12, 2007 mukaisesti. Häirityllä kartiokokeella määritetyt juoksurajan arvot on esitetty kuvassa 4.9. Juoksurajan arvot vaihtelevat välillä 60–70 % ja keskiarvoksi tutkitulla syvyydellä määritettiin 65 %.

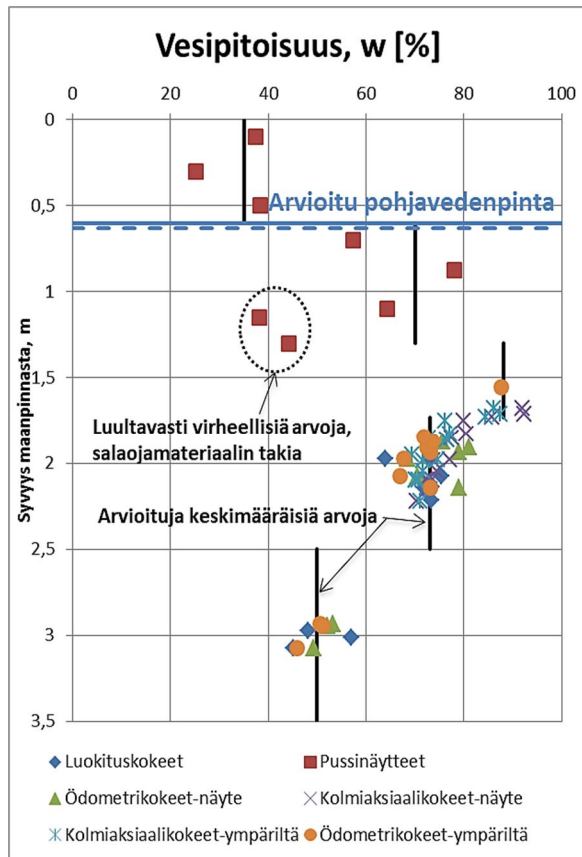
Työn aikana tehtiin myös kaksi kieritysrajakoea. Kieritysrajakokeessa savesta muotoillaan rihma, jonka paksuus on 3 mm pyörittämällä esimerkiksi lasilevyn päällä. Mikäli rihma kestää se muotoillaan palloksi ja tämän jälkeen uudelleen rihmaksi. Tätä jatketaan niin kauan, kunnes 3 mm paksua rihmaa ei enää pystytä pyörittämään näytteen murtumatta sekä poikki- että pituussuunnassa (CEN ISO/TS 17892-12, 2007). Näytteestä määritetään tämän jälkeen vesipitoisuus, joka vastaa kieritysrajaa. Kieritysrajan arvoiksi saatiin tutkitulle syvyydelle 1,6–2,2 m noin 29 % ja syvyydelle noin 3 m noin 25 %.

### **Rakeisuus**

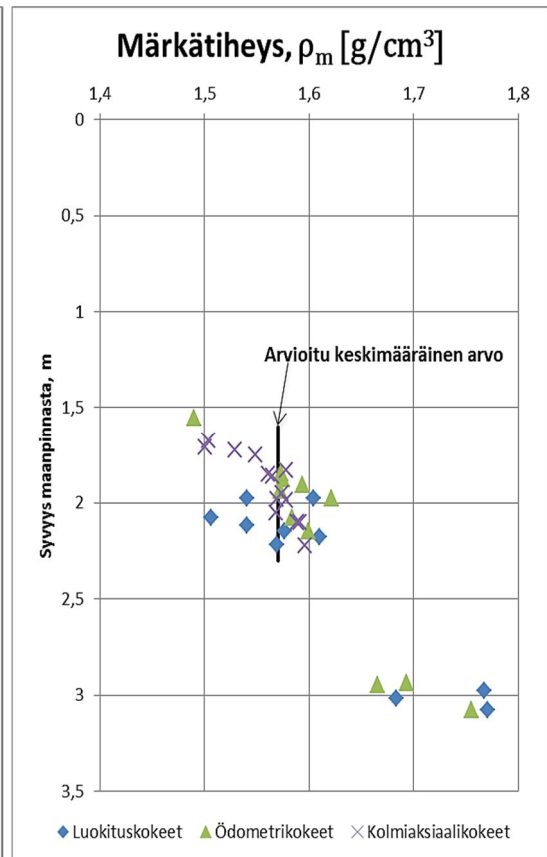
Kaikista käytetyistä näyteputkista tehtiin luokituskokeiden yhteydessä rakeisuusmäärittys. Rakeisuusmäärittymisen avulla maalajit nimettiin ja saatiin myös tietää näytteen savi-pitoisuus, jota tarvitaan humuspitoisuuden laskennassa. Näytteiden rakeisuus määritettiin CENin teknisen spesifikaation CEN ISO/TS 17892-4, 2007 ohjeiden mukaisesti.

Rakeisuusmäärittymisen tulokset on esitetty kuvissa 4.11–4.14. Tuloksista on tulkittu näytteiden maalajit geoteknisen maalajiluokituksen (Korhonen et al. 1974) ja teknisen spesifikaation (EN ISO 14688-2.) ohjeiden mukaisesti. Tulkitut maalajinimet on koottu taulukkoon 5.1, mutta ne löytyvät myös kuvista 5.11–5.14. Tutkitulla syvyydellä geoteknisen maalajiluokituksen mukaan nimeksi tulee lihava savi (liSa) ja teknisen spesifikaation mukaan clay (CI). Rakeisuusmäärittymisestä saadut savipitoisuudet on esitetty taulukossa 4.1 ja kuvassa 4.10. Tutkitulla syvyydellä keskimääräinen savipitoisuus on 80 % ja noin kolmen metrin syvyydellä noin 40 %.

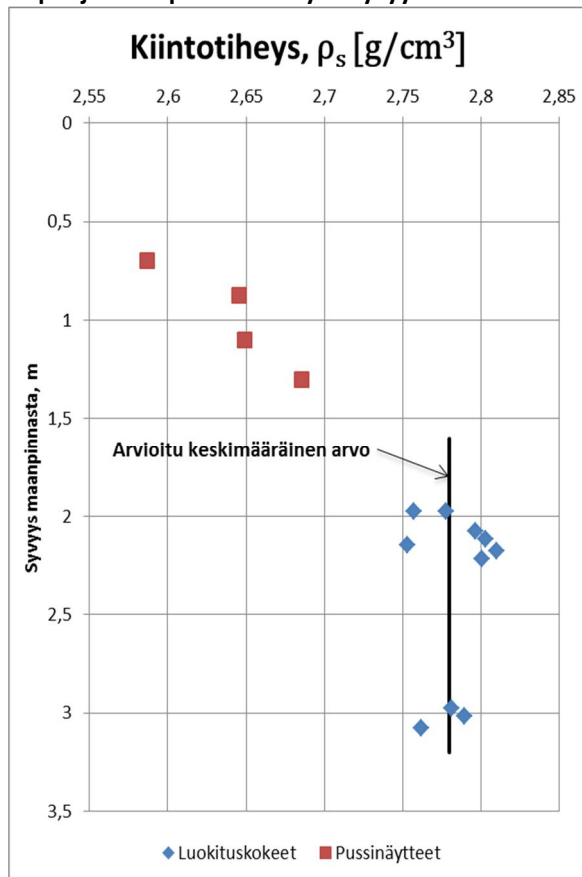
Jotta areometrikokeesta saadaan tarkka tulos, on tiedettävä tarkkaan kuinka paljon kokeessa käytettävän näytteen kuiva massa on. Tämä on tietysti helppoa käytettäessä kuivaa näytettä. Kuivan näytteen käytössä voisi kuitenkin olla seuraavia ongelmia, jotka vääristävät tulosta: rakeet eivät välttämättä irtoa toisistaan kuivattamisen jälkeen ja kuivatun näytteen hajottamiseen käytetty mylly saattaa rikkoa myös itse rakeita. Vaihtoehtona olisi märän näytteen käyttö. Työn aikana tehtiin koe, jossa tehtiin kaksi aerometrikoea, toinen kuivalla ja toinen märällä näytteellä. Märästä näytteestä tehtiin vesipitoisuusmäärittys päivää aikaisemmin ja näin pystyttiin lasketaan kuinka paljon märkää näytettä piti käyttää, jotta se vastaisi käytetyn kuivan näytteen painoa. Areometrikokeista saadut rakeisuus käyrät näkyvät kuvassa 4.15. Kuvasta nähdään, että rakeisuuskäyrän pisteet ovat täsmälleen samoissa kohdissa, näin ollen voidaan sanoa, että ainakin käytössä olleella laitteistolla tuloksissa ei ilmene eroa. Kokeen suorituksen kannalta kuivan näytteen käyttö on helpompaa.



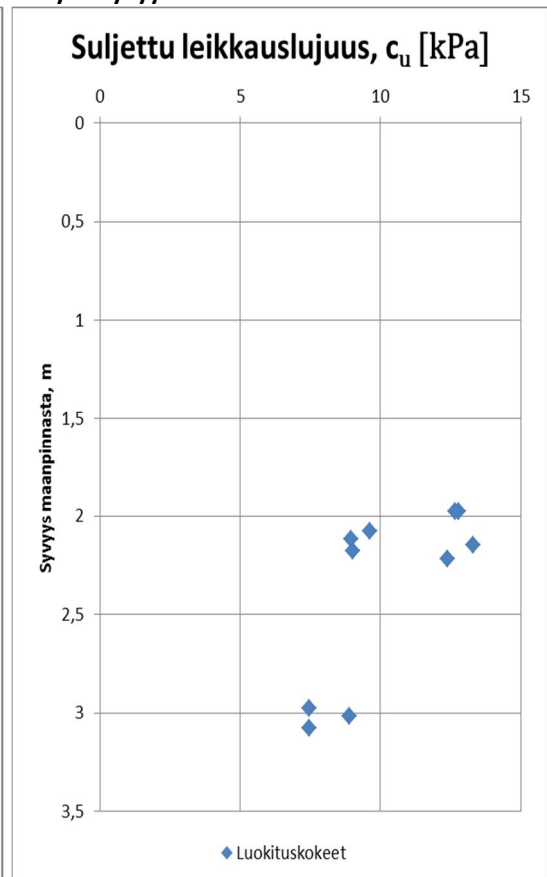
Kuva 4.3. Määritetyt vesipitoisuuden arvot ja tulkitut pohjavedenpinta esitettynä syvyyden suhteen



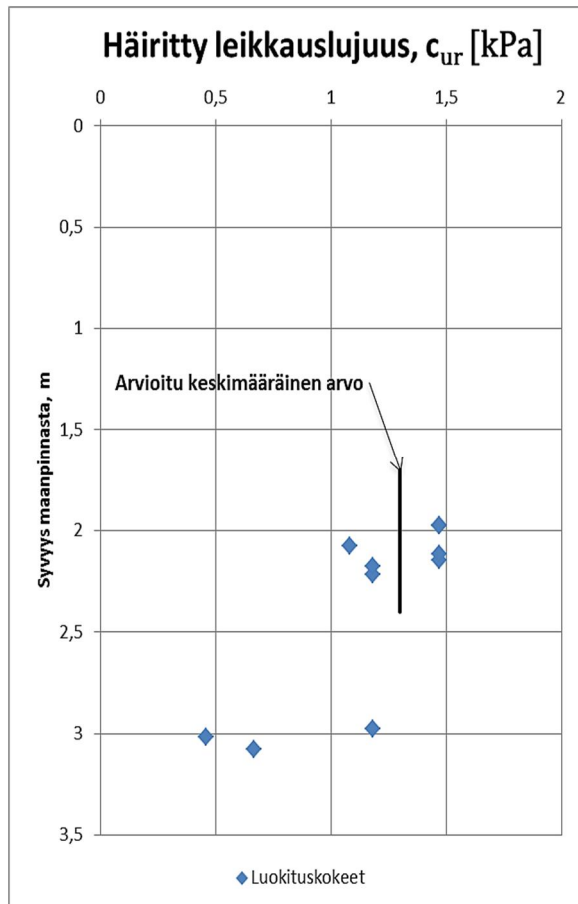
Kuva 4.4. Määritetyt märkätiheyden arvot esitettynä syvyyden suhteen



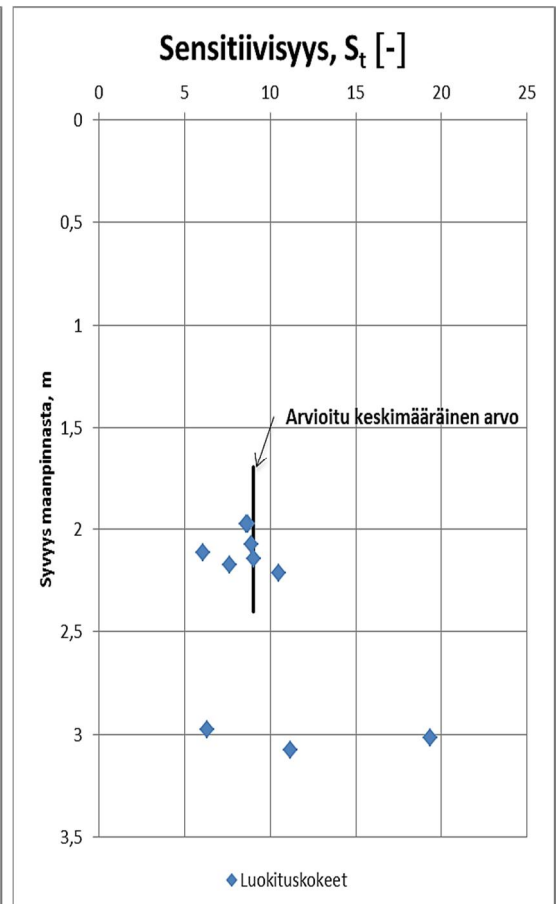
Kuva 4.5. Määritetyt kiintotiheyden arvot esitettynä syvyyden suhteen



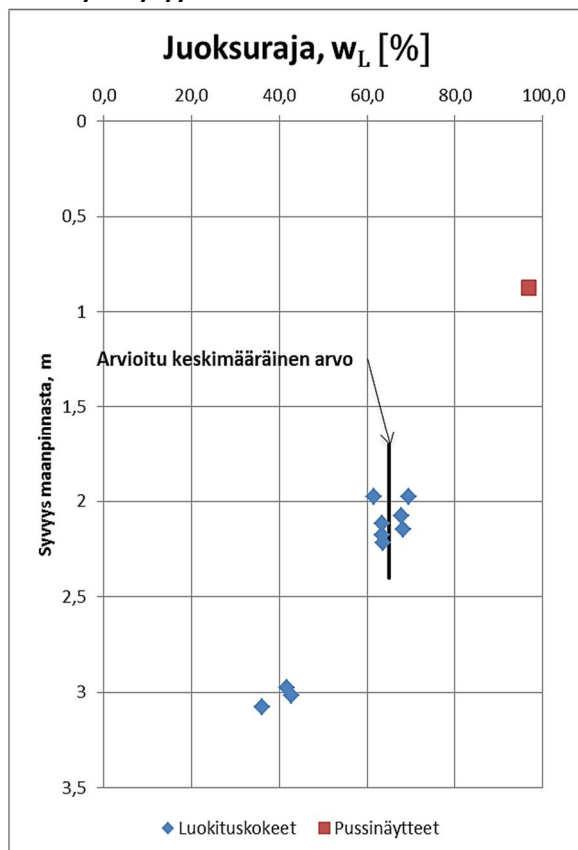
Kuva 4.6. Määritetyt suljetun leikkauslujuuden arvot esitettynä syvyyden suhteen



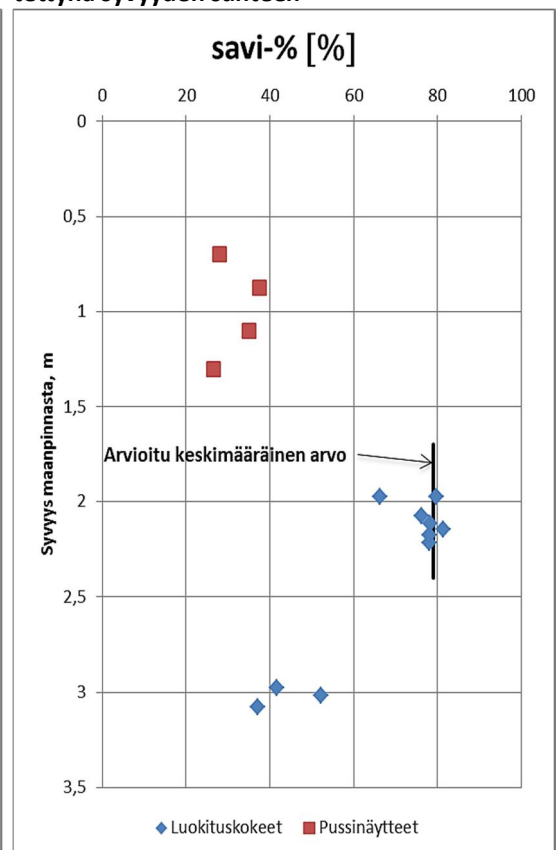
Kuva 4.7. Määritetyt häirityn leikkauslujuuden arvot esitettynä syvyyden suhteen



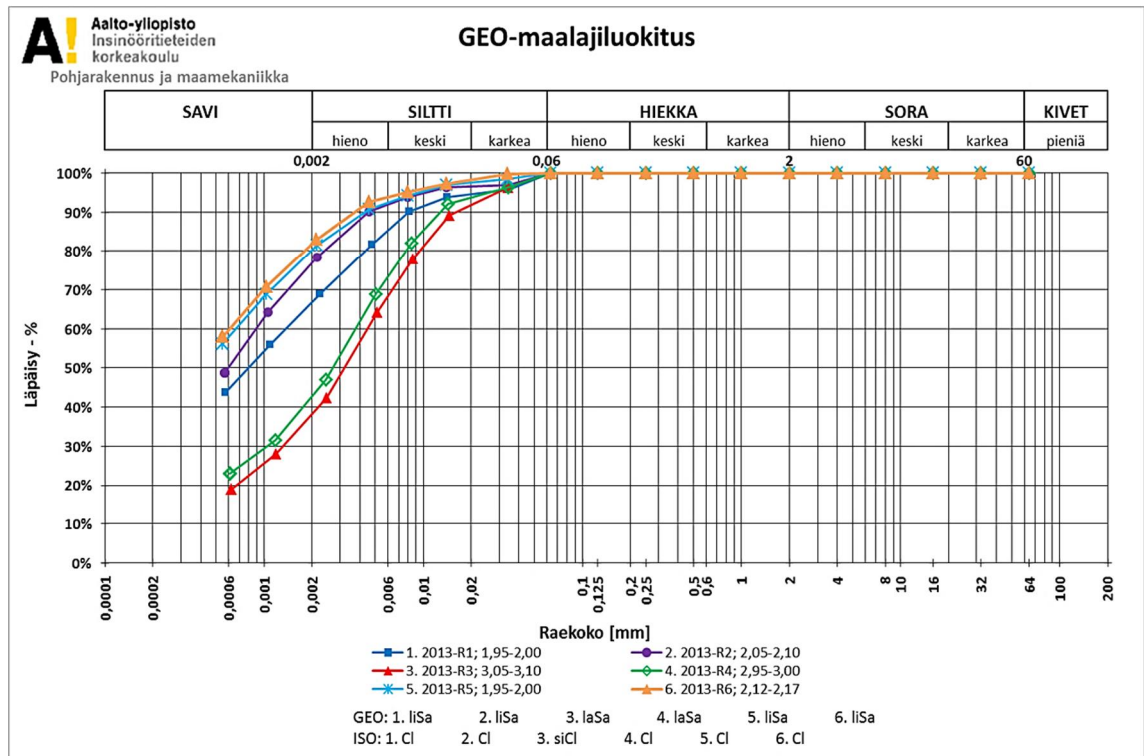
Kuva 4.8. Määritetyt sensitiivisyyden arvot esitettynä syvyyden suhteen



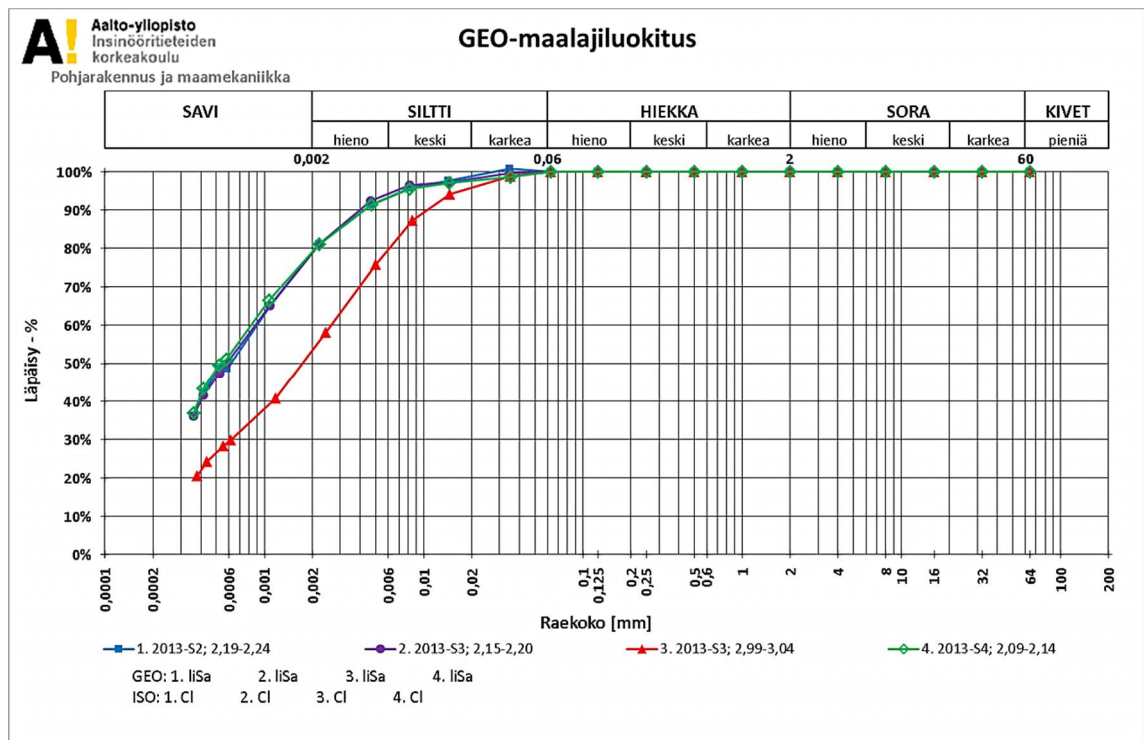
Kuva 4.9. Määritetyt juoksurajan arvot esitettynä syvyyden suhteen



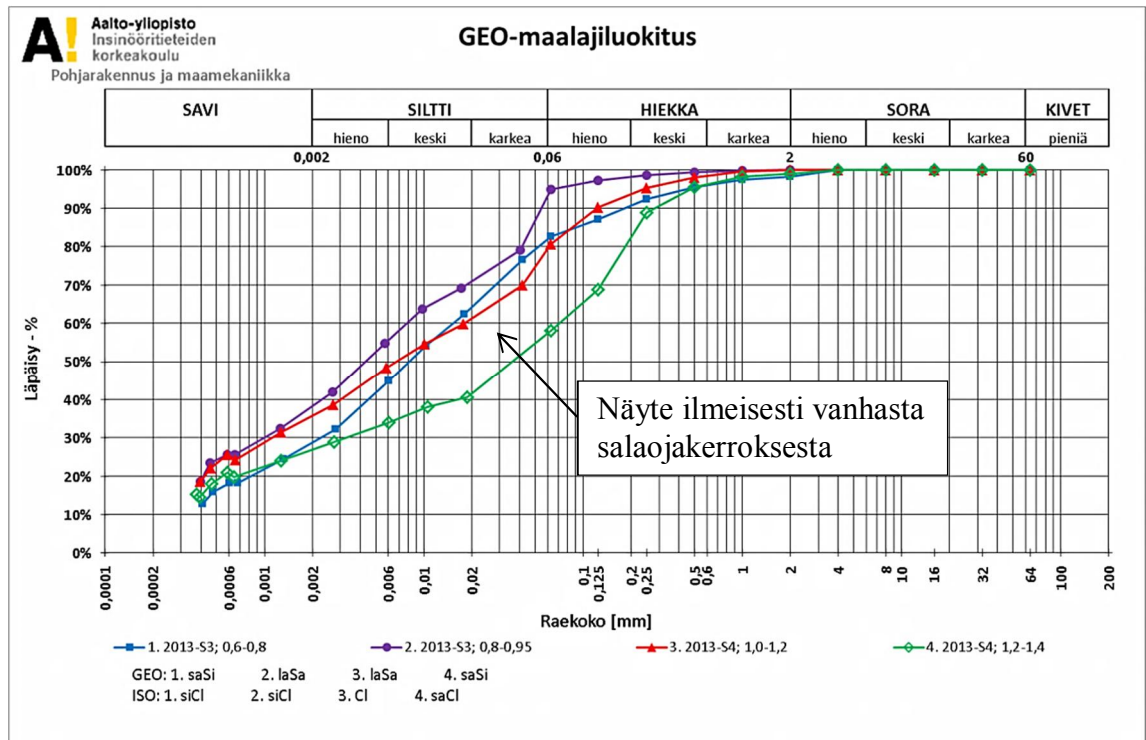
Kuva 4.10. Määritetyt näytteen savipitoisuuden arvot esitettynä syvyyden suhteen



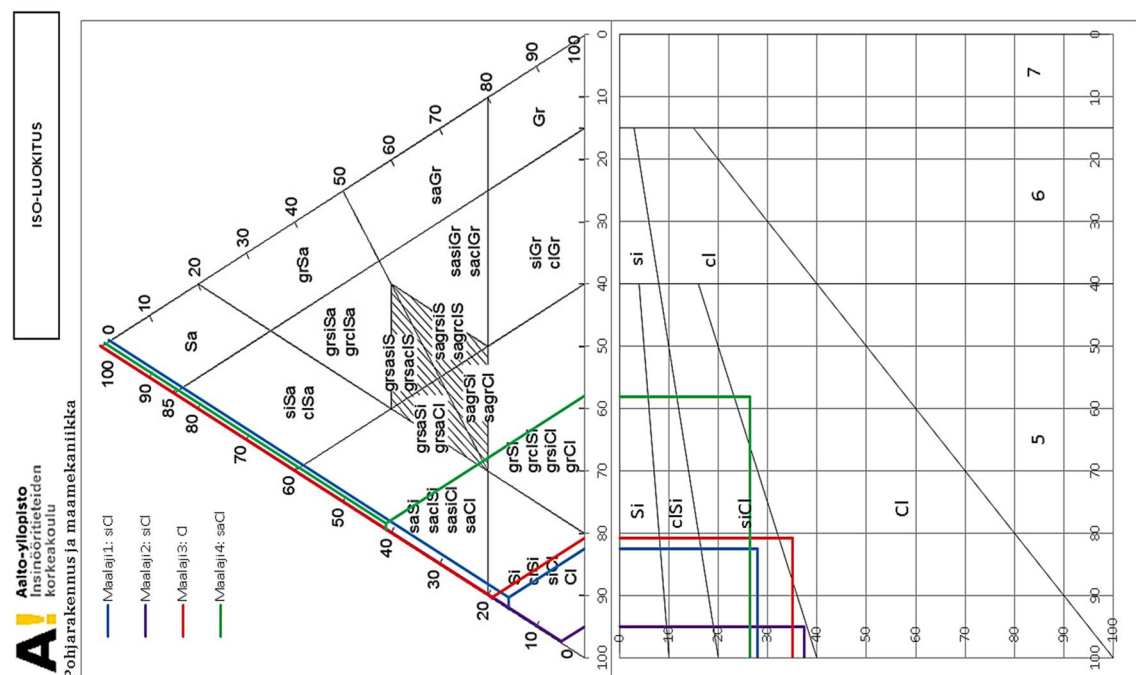
Kuva 4.11. Keväällä 2013 otettujen putkinäytteiden rakeisuuskäyrät ja maalajinimet



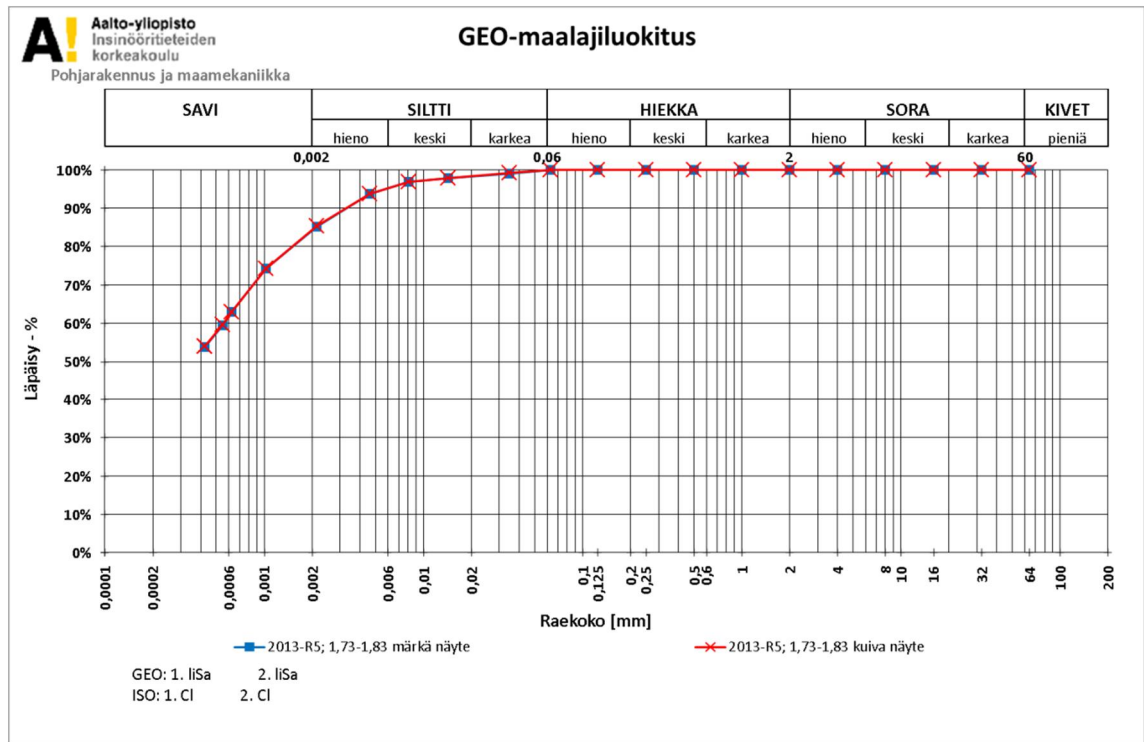
Kuva 4.12. Syksyllä 2013 otettujen putkinäytteiden rakeisuuskäyrät ja maalajinimet



Kuva 4.13. Syksyllä 2013 otettujen pussinäytteiden rakeisuuskäyrät ja maalajinimet



Kuva 4.14. Syksyllä 2013 otettujen putkinäytteiden rakeisuuskäyrät ja maalajinimet



**Kuva 4.15.** Kuivalla ja märällä näytteellä suoritetusta areometrikokeesta saatu rakeisuuskäyrä



Taulukko 4.1. Luokituskoetulokset näyteputkista ja pussinäytteistä

HUT-CLAYN LUOKITUSOMINAISUUDET																
Luokitustiedot putkinäytteistä																
Piste	Putki	Syvyys maanpinnasta	Vesi- pitoisuus	Suljettu leikkauslujuus	häiritty leikkauslujuus	Sensi- tiivisyys	juoksu- raja	kieritys- raja	märkä- tiheys	märkä- tilavuuspaino	kiinto- tiheys	humus- pitoisuus	savi- pitoisuus	maalaji (GEO)	maalaji (ISO)	
tunniste	tunniste	z, m	w, %	c <sub>u</sub> , kPa	c <sub>ur</sub> , kPa	S <sub>t</sub>	%	%	ρ <sub>m</sub> , g/cm <sup>3</sup>	γ <sub>m</sub> , kN/m <sup>3</sup>	ρ <sub>s</sub> , g/cm <sup>3</sup>	%	%	nimi	nimi	
2013-R1	1	1,95-2,00	64,0	12,8	1,5	8,7	61,5		1,60	15,73	2,78	-0,4	66,2	liSa	Cl	
2013-R2	2	2,05-2,10	75,4	9,6	1,1	8,9	67,9		1,51	14,77	2,80	-0,5	76,2	liSa	Cl	
2013-R3	3	3,05-3,10	45,2	7,5	0,7	11,2	36,1		1,77	17,37	2,76	-0,5	37,1	laSa	siCl	
2013-R4	63	2,95-3,00	48,1	7,5	1,2	6,3	41,8	25,0	1,77	17,33	2,78	-0,6	41,6	laSa	Cl	
2013-R5	100	1,95-2,00	73,2	12,7	1,5	8,6	69,6	29,0	1,54	15,10	2,76	-0,1	79,8	liSa	Cl	
2013-R6	49	2,12-2,17	71,9	13,3	1,5	9,0	68,3		1,58	15,46	2,75	0,1	81,5	liSa	Cl	
2013-S2	T2	2,19-2,24	73,3	12,4	1,2	10,5	63,7		1,57	15,39	2,80	0,0	78,1	liSa	Cl	
2013-S3	T3	2,15-2,20	72,8	9,0	1,2	7,6	63,4		1,61	15,78	2,81	0,0	78,1	liSa	Cl	
2013-S4	T4	2,99-3,04	56,9	8,9	0,5	19,3	42,7		1,68	16,51	2,79	-0,4	52,1	liSa	Cl	
2013-S5	T5	2,09-2,14	73,0	9,0	1,5	6,1	63,5		1,54	15,11	2,80	-0,1	78,4	liSa	Cl	
Luokitustiedot pussinäytteistä																
2013-S3	pussi	0,00-0,20	37,5													
2013-S3	pussi	0,20-0,40	25,3													
2013-S3	pussi	0,40-0,60	38,4													
2013-S3	pussi	0,60-0,80	57,4													
2013-S3	pussi	0,80-0,95	78,0		5,9		96,8				2,59	6,3	27,9	saSi	siCl	
2013-S3	pussi	1,10-1,20	38,2								2,65	4,6	37,4	laSa	siCl	
2013-S4	pussi	1,00-1,20	64,3								2,65	3,1	35,1	laSa	Cl	
2013-S4	pussi	1,20-1,40	44,3								2,69	1,2	26,5	saSi	saCl	

**Taulukko 4.2. Luokitusominaisuuksia ödometri- ja kolmiaksiaalikoikeista**

HUT-CLAYN LUOKITUSOMINAISUUDET							
Luokitustiedot ödometrikokeista							
koe- numero	Piste	Putki	Syvyys maanpinnasta	Vesipitoisuus näyte	ympärltä	märkä- tiheys	märkä- tilavuuspaino
nro	tunniste	tunniste	z, m	w, %	w, %	$\rho_m, \text{g/cm}^3$	$\gamma_m, \text{kN/m}^3$
6149	2013-R1	1	1,95-2,00	68,5	67,7	1,62	15,90
6150	2013-R2	2	2,05-2,1	70,6	66,9	1,58	15,53
6151	2013-R6	49	2,12-2,17	79,0	73,1	1,60	15,68
6152	2013-R3	3	3,05-3,10	49,3	45,9	1,75	17,21
6153	2013-R4	63	2,92-2,95	53,3	50,5	1,69	16,60
6167	2013-R5	100	1,92-1,95	78,9	73,1	1,57	15,42
6168	2013-R5	100	1,89-1,92	81,0	72,3	1,59	15,63
6169	2013-R3	3	2,93-2,96	52,0	51,1	1,67	16,33
6170	2013-R5	100	1,86-1,89	75,6	73,5	1,57	15,44
6171	2013-R5	100	1,83-1,86	75,6	71,9	1,57	15,43
6183	2013-R5	100	1,54-1,57	91,7	87,6	1,49	14,61
Luokitustiedot kolmiaksiaalikoikeista							
CAD6158	2013-R6	49	2,00-2,10	74,4	71,7	1,57	15,38
CAD6159	2013-R6	49	1,90-2,00	72,8	69,4	1,57	15,43
CAD6180	2013-R6	49	1,67-1,78	85,7	84,4	1,53	15,00
CAD6182	2013-R5	100	1,62-1,73	91,9	86,2	1,50	14,75
CAD6212	2013-S1	T1	1,93-2,04	73,8	71,7	1,58	15,48
CAD6229	2013-O	427	2,04-2,16	72,3	70,1	1,59	15,58
CADC6166	2013-R2	2	1,70-1,80	79,9	76,1	1,55	15,19
CADU6216	2013-S2	T2	1,65-1,77	92,4	87,4	1,50	14,72
CADU6211	2013-S1	T1	2,04-2,16	73,6	70,7	1,59	15,58
CADU6247	2013-O	427	1,80-1,92	76,5	76,5	1,57	15,35
CAUC6165	2013-R2	2	1,80-1,90	77,4	72,8	1,56	15,31
CAUC6215	2013-S2	T2	1,77-1,89	80,5	77,1	1,58	15,47
CAUC6228	2013-O	427	2,16-2,28	70,3	71,1	1,60	15,65
CAUC6234	2013-O	427	2,04-2,16	72,6	70,1	1,59	15,61
CAUC6246	2013-O	427	1,92-2,04	77,0	74,6	1,57	15,39

## 5 Ödometrikokeet

### 5.1 Laitteisto ja kokeen periaate

Portaittaiset ödometrikokeet suoritettiin pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa kuvan 5.1 mukaisella laitteistolla. Kokeet suoritettiin noudattaen lähes kaikkia CENin teknisen spesifikaation CEN ISO/TS 17892-5, 2007 vaatimuksia, liitteessä 1 on käyty vaatimuksia tarkemmin läpi. Koelaitteistossa jännityksen lisäys tapahtuu portaittain. Jännityksen lisäyksen suhdetta kuvataan lyhenteellä LIR (load increment ratio), joka on lisättävän jännityksen ja vallitsevan jännityksen suhde. Yleensä portaittaisessa ödometrikokeessa  $LIR=1$ , eli jännitys kaksinkertaistetaan jokaisella kuormitusportaalla. Työn aikana tehtiin kokeiluja myös pienemmillä kuormitussuhteilla. Kuten yleensäkin ödometrikokeessa, kokeen alussa muutaman ensimmäisen portaan kestoajat ovat lyhyitä, mutta kun on päästy luonnontilassa vallitsevaan jännitykseen, käytetään yleensä noin päivän mittaisia kuormitusaikoja. Kokeita tehdään myös pidemmällä, esimerkiksi viikon mittaisilla kuormitusportailla.



Kuva 5.1. Ödometrikoelaitteistoa pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa

### 5.2 Tavallisten portaittaisten ödometrien tulosten tarkastelu

Ödometrikoenäytteistä on määritetty ödometrikokeen ohella myös luokitustiedoista vesipitoisuus, märkätiheys ja märkätilavuuspaino, nämä tiedot on koottu taulukkoon 4.2. Ödometrikokeesta saatavia parametreja ovat konsolidaatiokerroin (Taylorin ja Casagranden menetelmillä), esikonsolidaatiojännitys, vedenläpäisevyys, kriittisen tilan mallin parametrit  $\lambda$  ja  $\kappa$  ja tangenttimoduulin konseptin parametrit  $m$  ja  $\beta$  normaali- ja ylikonsolidoituneelle alueelle.

Konsolidaatiokertoimen määrittystä Taylorin ja Casagranden menetelmillä on käsitelty kohdassa 2.2.3. Ödometrikokeista Taylorin menetelmällä saadut konsolidaatiokertoimen arvot on esitetty kuvassa 5.2 ja vastaavasti Casagranden menetelmällä saadut kuvassa 5.3. Kuvista 5.2 ja 5.3 nähdään, että  $c_v$  arvo laskee mentäessä ylikonsolidoituneelta alu-

eelta normaalikonsolidoituneelle. Arvo kuitenkin nousee tasaisesti jännityksen kasvaessa. Noin kahden metrin syvyydestä otetut näytteet ja noin kolmenmetrin syvyydestä otetut näytteet muodostavat omat ryhmänsä. Konsolidaatiokertoimen arvot vaihtelivat Taylorin menetelmällä noin välillä  $0,5\text{--}3\text{ m}^2/\text{a}$  ja Casagranden menetelmällä noin välillä  $0,3\text{--}2\text{ m}^2/\text{a}$ , kertoimien arvot kasvavat jännityksen suurenessa. Keskimääräiseksi arvoksi normaalikonsolidoituneella alueella arvioitiin noin  $1\text{ m}^2/\text{a}$  Taylorin menetelmällä ja Casagranden menetelmällä noin  $0,8\text{--}1\text{ m}^2/\text{a}$  noin kahden metrin syvyydessä.

Konsolidaatiokertoimista määritetyt vedenläpäisevyydet on koottu puolilogaritmiseen kuvaajaan (kuvat 5.4 ja 5.5) pystysuuntaisen muodonmuutoksen funktiona. Kuvaajassa määritetyt vedenläpäisevyydet oikeenevat suoraksi ja ne pystytään esittämään parametri- $k_0$  ja  $\beta_k$  avulla (kaava 5.1) (Bengtsson & Larsson, 1994). Saadut parametrien  $k_0$  ja  $\beta_k$  arvot on koottu taulukkoon 5.1.

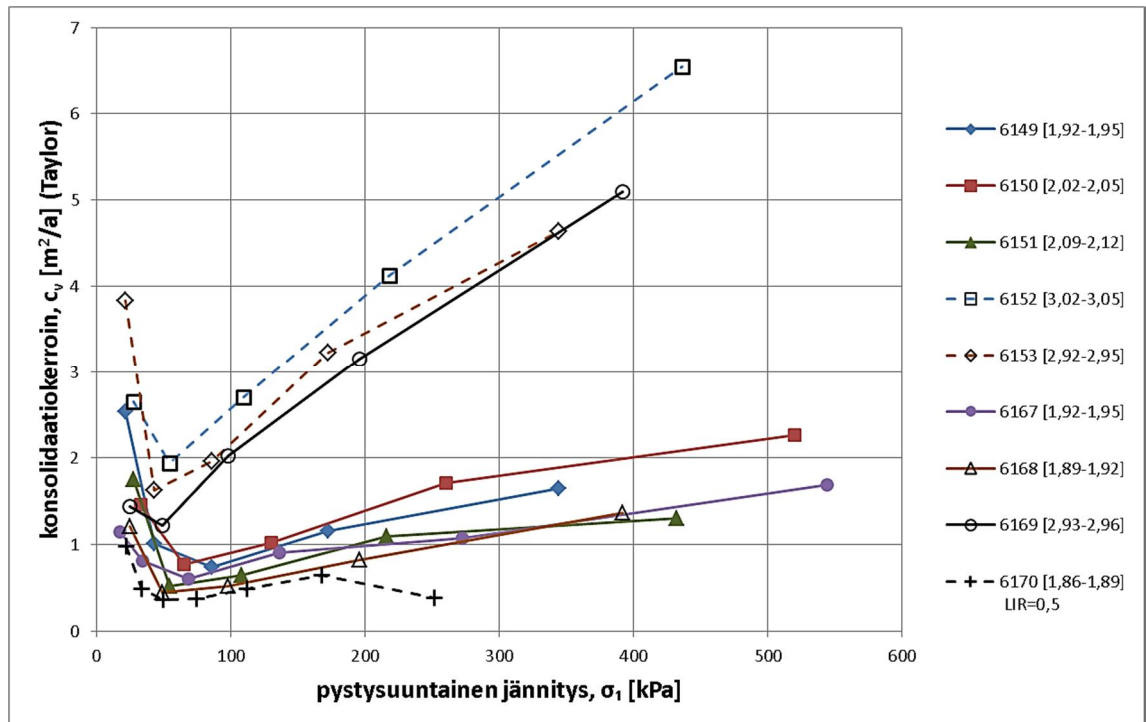
$$\beta_k = \frac{\ln(k/k_0)}{\Delta \varepsilon_1} \quad (5.1)$$

missä  $\beta_k$  on vedenläpäisevyyden muutos parametri [-]  
 $k_0$  vedenläpäisevyyskerroin kun  $\varepsilon_1=0$  [m/s]  
 $\varepsilon_1$  pystysuuntainen muodonmuutos [%]

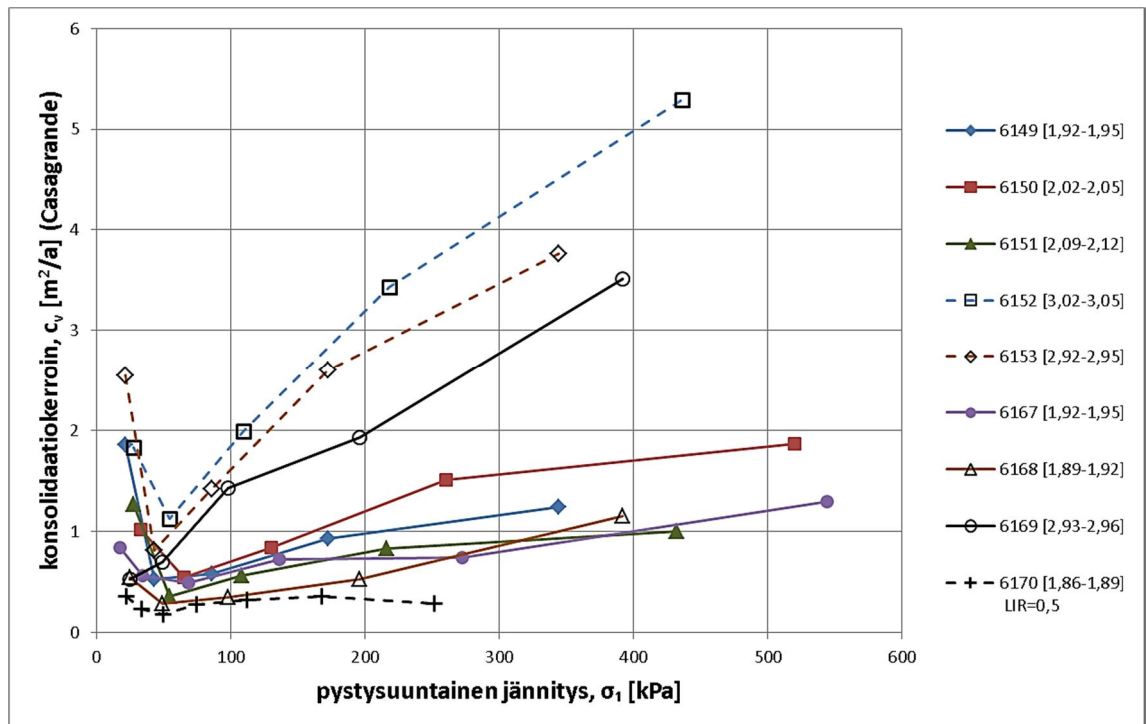
Kuvista 5.4 ja 5.5 voidaan huomata, että syvyydeltä noin kaksi ja kolme metriä olevat näytteet muodostavat oman ryhmänsä. Koska työssä on tutkittu lähinnä kahden metrin syvyydeltä otettuja näytteitä, on vedenläpäisevyys tulkittu näitten pisteitten mukaan. Lisäksi LIR=0,5 suhteella tehty koe antaa pienemmän vedenläpäisevyyden arvon. Kuvasta 5.4 (Taylor) saadaan parametrien keskimääräisiksi arvoiksi  $k_0=1 \cdot 10^{-9}\text{ m/s}$  ja  $\beta_k=3,81$ . Vastaavasti kuvasta 5.5 (Casagrande) saadaan parametrien keskimääräisiksi arvoiksi  $k_0=0,85 \cdot 10^{-9}\text{ m/s}$  ja  $\beta_k=3,63$ .

Parametrien  $\lambda$  ja  $\kappa$  arvot on määritetty koekohtaisesti. Sen lisäksi määritettiin keskimääräinen arvo yhdistelmäkuvasta 5.6. Saadut arvot on myös koottu taulukkoon 5.1. Kuvasta 5.6 voidaan arvioida näytteiden esikonsolidaatiojännitystä. Kuvassa 5.6 ominaistilavuuskäyrät ovat hyvin samanmuotoisia. Parametrien  $\lambda$  arvot vaihtelevat välillä  $0,27\text{--}0,33$  ja parametrien  $\kappa$  arvot välillä  $0,045\text{--}0,06$ , keskimääräisiksi arvoiksi määritettiin kuvasta 5.6  $\lambda=0,3$  ja  $\kappa=0,05$ . Esikonsolidaatiojännitystä on arvioitu siirtämällä  $\kappa$ -sovitussviiva ensikuormituksen ylikonsolidoituneelle alueelle. Tämän sovitussviivan ja  $\lambda$ -sovitussviivan risteyskohdasta on luettu arvio esikonsolidaatiojännitykselle, joka on  $23\text{ kPa}$ . Huomattavaa on, että kaksi pienemmälläkin jännityssuhteella tehtyä koetta noudattavat samaa muotoa. Täten jännityksen lisäyksen suhde ei vaikuttaisi näytteen lopulliseen muodonmuutokseen.

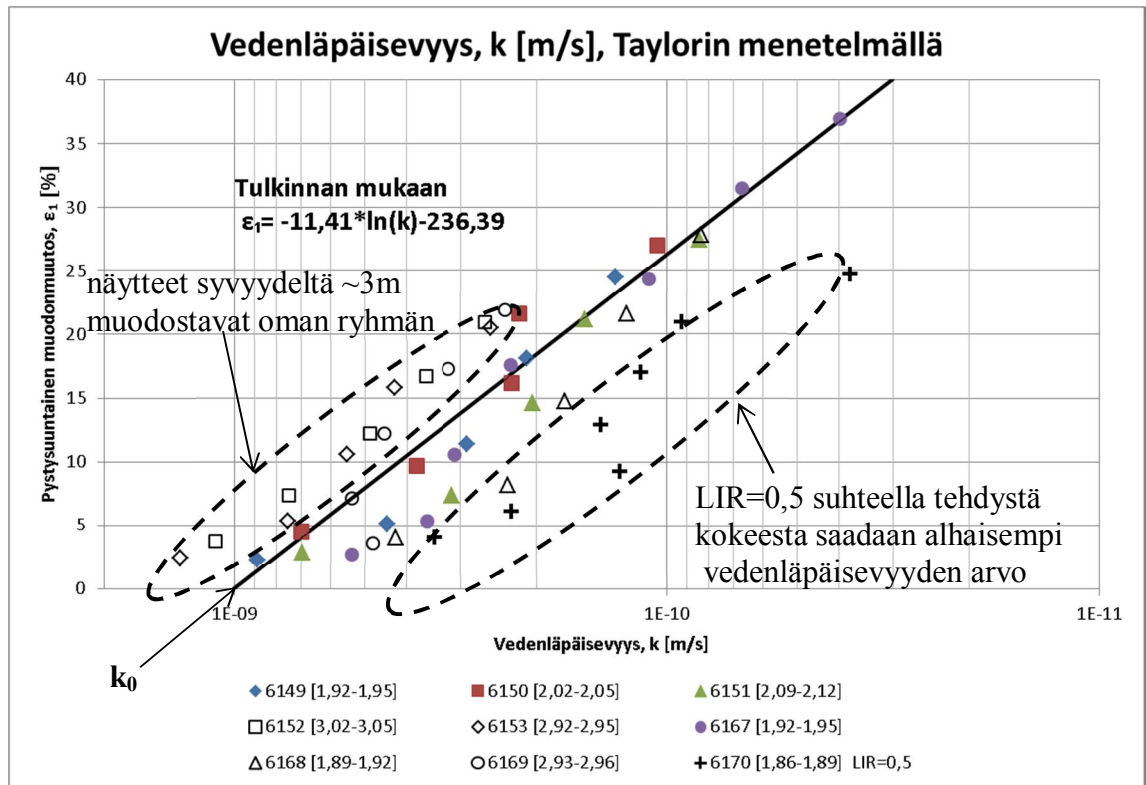
HUT-menetelmällä saadut koekohtaiset esikonsolidaatiojännityksen ja yli- ja normaalikonsolidoituneen alueen  $\sigma_p$ ,  $m$  ja  $\beta$  arvot on koottu taulukkoon 5.1. Saaduista arvoista huomataan  $\beta$ :n olevan hyvin lähellä nollaa. Kun  $\beta$ :n arvo lähenee nollaa, kokoonpuristuvuusmoduulin  $M$  pitäisi käyttäytyä normaalikonsolidoituneella alueella lineaarisesti jännityksen funktiona. Kuvaan 5.7 on koottu kokeista  $M$ :n arvot jännityksen funktiona ja arvioitu myös tämän avulla esikonsolidaatiojännitystä, jonka arvoksi saatiin  $22\text{ kPa}$  (Larsson et al. 1997).



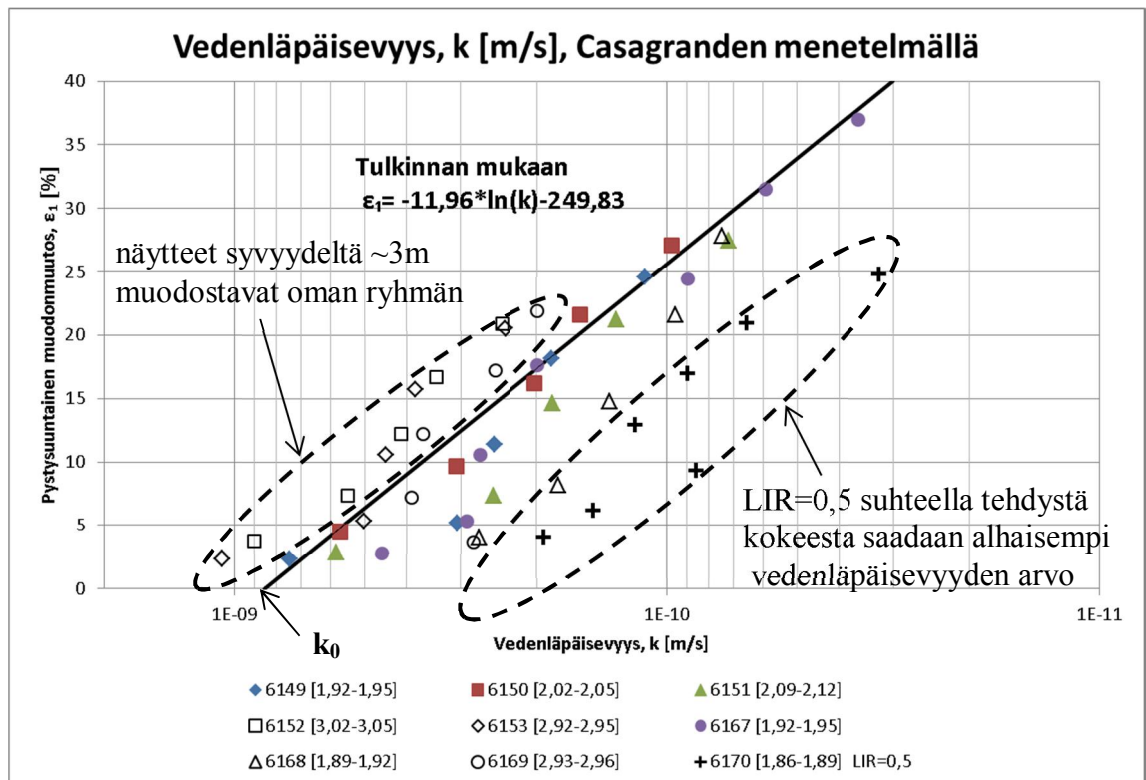
Kuva 5.2. Taylorin menetelmällä saadut konsolidaatiokerroimen  $c_v$  arvot



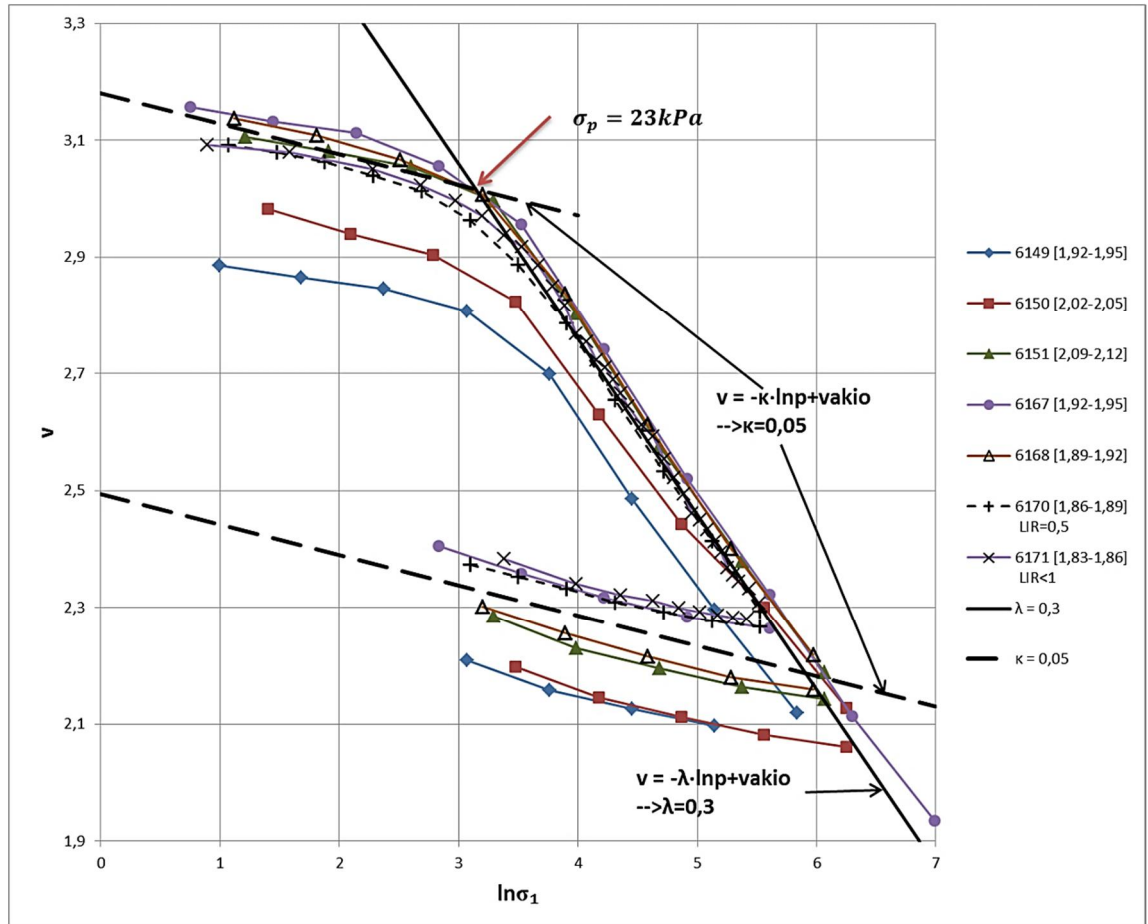
Kuva 5.3. Casagranden menetelmällä saadut konsolidaatiokerroimen  $c_v$  arvot



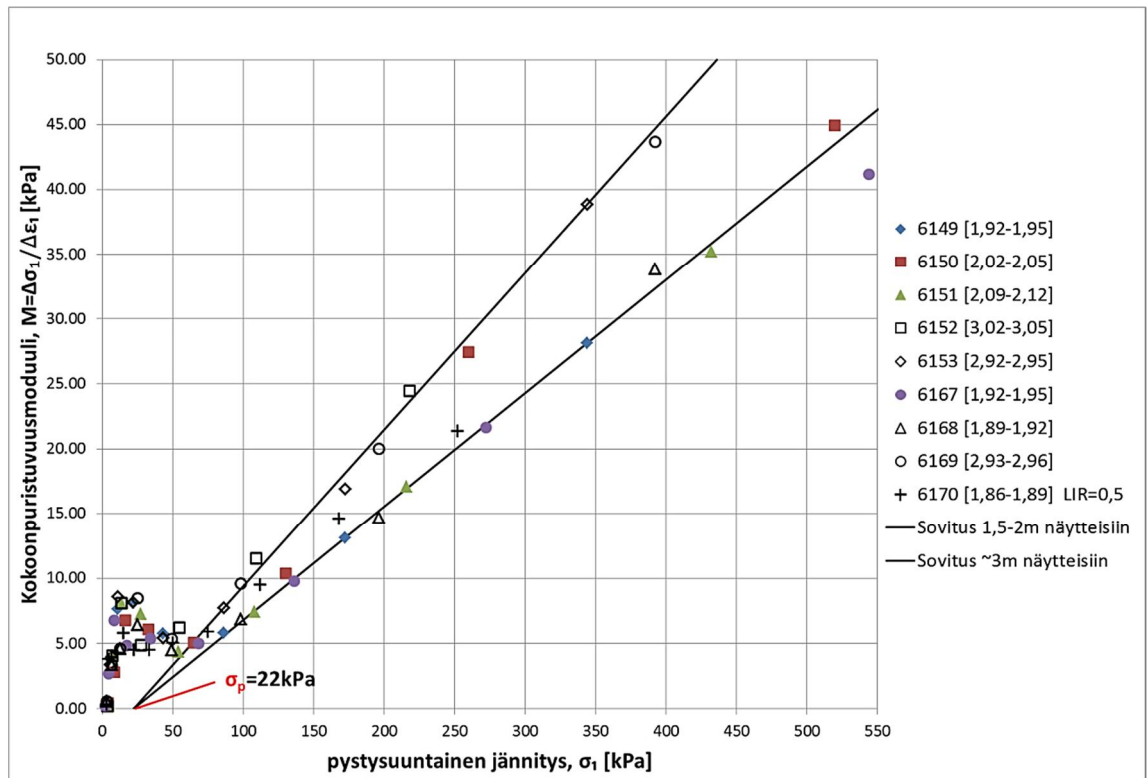
Kuva 5.4. Vedenläpäisevyyden arvot laskettuna Taylorin menetelmällä saaduista konsolidaatioker-toimista



Kuva 5.5. Vedenläpäisevyyden arvot laskettuna Casagranden menetelmällä saaduista konsolidaa-tiokertoimista



Kuva 5.6. Parametrien  $\lambda$  ja  $\kappa$  määrittäminen  $\ln \sigma_1$  - $v$ -kuvaajasta ja arvio esikonsolidaatiojännitykselle



Kuva 5.7. Esikonsolidaatiojännityksen arviointi kokoonpuristuvuusmoduulin avulla



Taulukko 5.1. Tavallista portaitaista ödometrikokeista saadut tulokset

Koe- ja pistetiedot				Vedenläpäisevyys				Konsolidaatiojännitys, moduuli ja jännityseksponentti Lambda ja kappa								
koe- numero	Piste	Putki	Syvyys maanpinnasta	LIR	Taylor		Casagrande		NK-alue			YK-alue			λ	κ
nro	tunniste	tunniste	z, m	-	k <sub>0</sub> ·10 <sup>-9</sup> m/s	β <sub>κ</sub>	k <sub>0</sub> ·10 <sup>-9</sup> m/s	β <sub>κ</sub>	σ <sub>p</sub> kPa	m <sub>1</sub>	β <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	β <sub>2</sub>	-	-	
6149	2013-R1	1	1,95-2,00	1	0,87	3,58	0,72	3,54	31,70	10,15	-0,14	50,68	0,72	0,308	0,0528	
6150	2013-R2	2	2,05-2,1	1	0,96	3,48	0,75	3,26	24,96	11,77	-0,10	69,44	0,76	0,2707	0,0556	
6151	2013-R6	49	2,12-2,17	1	0,75	3,53	0,64	3,47	23,34	10,54	-0,04	60,35	0,76	0,327	0,0578	
6152	2013-R3	3	3,05-3,10	1	1,43	3,60	1,11	3,22	18,71	15,55	-0,04	60,74	0,76	0,161	0,0439	
6153	2013-R4	63	2,92-2,95	1	1,45	3,71	1,13	3,47	27,95	13,42	-0,16	74,35	0,66	0,202	0,0297	
6167	2013-R5	100	1,92-1,95	1	0,62	2,98	0,55	3,05	26,14	10,29	-0,06	43,30	0,71	0,311	0,0519	
6168	2013-R5	100	1,89-1,92	1	0,48	2,85	0,31	2,32	30,84	10,16	-0,14	55,34	0,67	0,323	0,0585	
6169	2013-R3	3	2,93-2,96	1	0,86	2,53	0,64	2,28	27,55	13,97	-0,09	102,70	0,76	0,186	0,0249	
6170	2013-R5	100	1,86-1,89	0,5	0,36	3,45	0,32	4,12	18,85	10,56	0,15	50,99	0,97	0,3	0,0487	
6171	2013-R5	100	1,83-1,86	<1	0,67	3,66	-	-	24,97	9,91	0,13	116,64	-0,10	0,317	0,0496	
6183	2013-R5	100	1,54-1,57	1	Sovitus: 1,00 3,81 0,85 3,63											

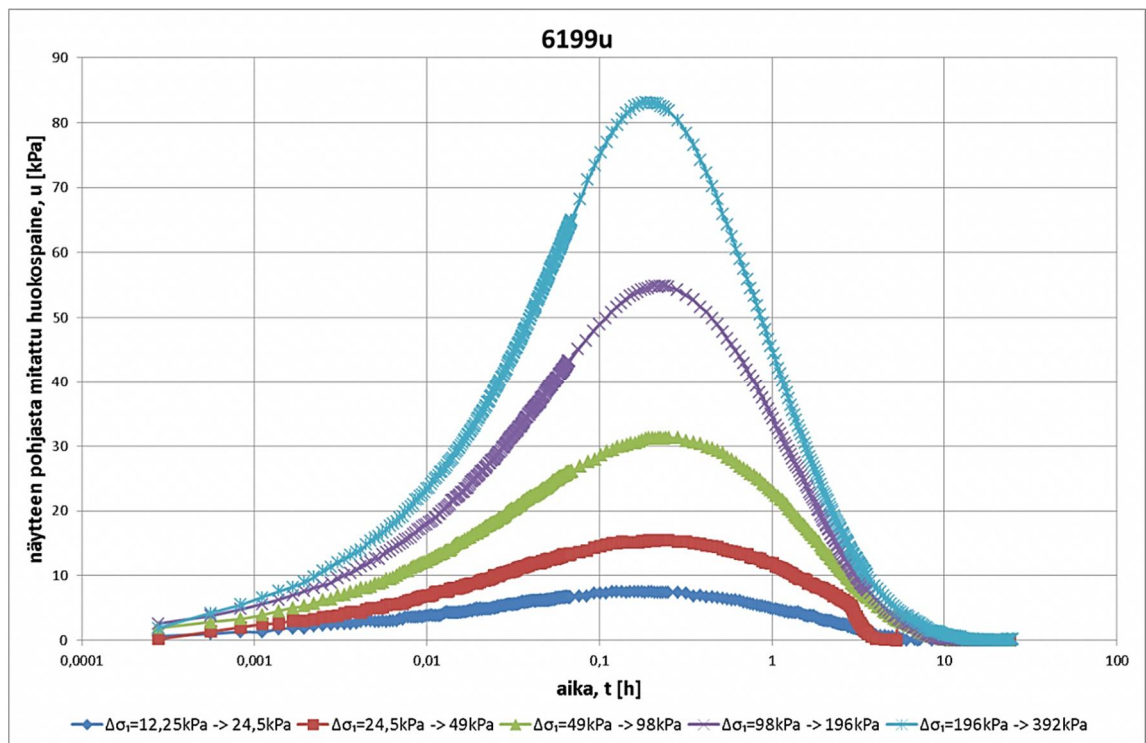


### 5.3 Huokospaineödometrien tulosten tarkastelu

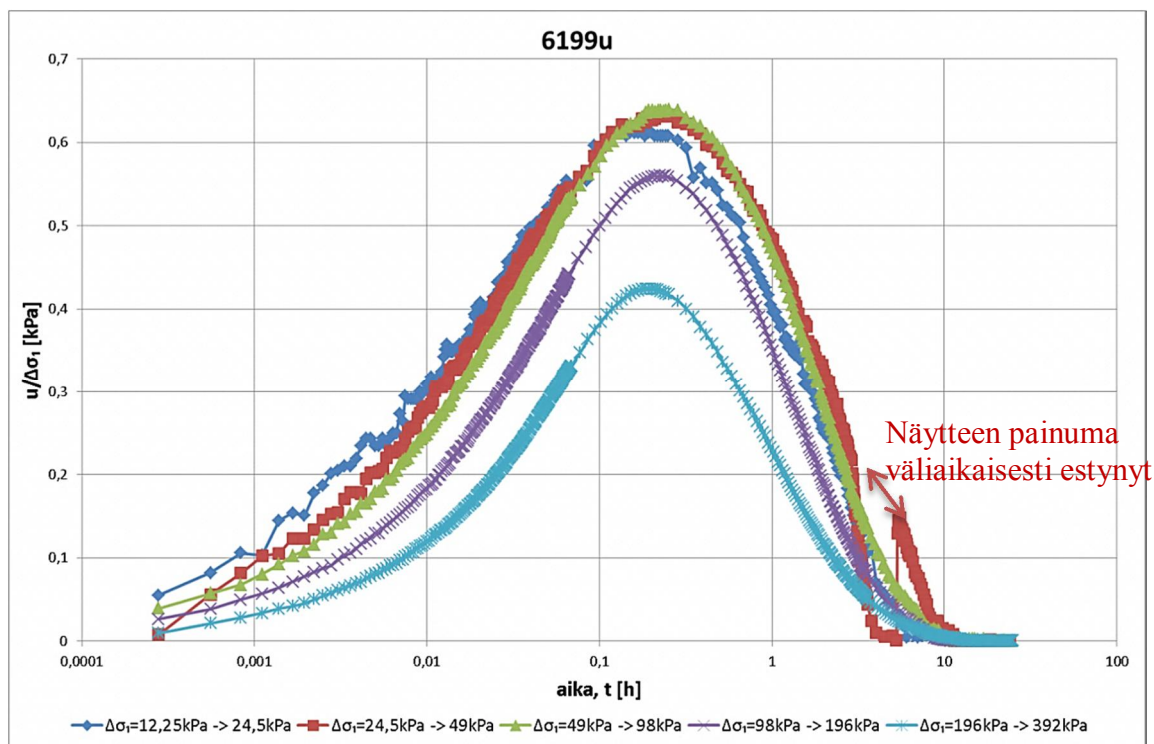
#### 5.3.1 Ensimmäiset kokeet ja tulokset

Huokospaineödometrillä tehtiin työn aikana yhteensä kahdeksan koetta, joista kolme ensimmäistä voidaan laskea omaan ryhmäänsä koevalmistelujen mukaan. Seitsemän kahdeksasta kokeesta tehtiin 20 mm korkealla näytteellä ja yksi noin 13 mm korkealla. Lisäksi kolmessa kokeessa huomattiin vuoto kokeen aikana, joten kaikkea mittausdataa ei näistä kokeista voitu käyttää hyväksi.

Ensimmäisissä kokeissa käytettävät huokoskivet puhdistettiin keittämällä. Niiden läpäisevyys tarkistettiin valuttamalla vettä tai puhaltamalla ilmaa kiven läpi. Näyte asennettiin. Kohdassa 3.1 on esitetty näytteen asennus. Huokospaineen käyttäytyminen yhden kokeen portaissa on esitetty kuvissa 5.8 ja 5.9. Kuvassa 5.8 on esitetty näytteen pohjalta mitatun huokospaineen suuruus ajan funktiona. Nähdään, että huokospaine saavuttaa maksimiarvonsa vasta noin 15 minuutin kohdalla. Huokospaineen käyttäytyminen on hyvin samanmuotoista portaissa. Kaikissa portaissa huokospaine on laskenut nollaan noin 10 tunnin kohdalla. Tulee muistaa, että käytössä on vain yksipuolinen kuivatus, joten aika on konsolidaatioteorian mukaan nelinkertainen normaaliin ödometrikokeeseen verrattuna. Kuvassa 5.9 on esitetty mitatun huokospaineen suhde lisättyyn pystysuuntaiseen jännitykseen ajan funktiona. Kuvasta havaitaan, että pienemmillä portailla lisätystä jännityksestä vain noin 60 % siirtyisi huokospaineelle ja isommalla portaalla vain noin 40 %. Osa erotuksesta pystytään selittämään ödometrirenkaan ja näytteen välisenä kitkana. Pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratoriossa on kuitenkin aikaisemmin tutkittu kitkan suuruutta. 50–100 kPa:n kuormilla kitkan suuruus oli noin 15–13 % kuormituksesta, mutta jo noin 400 kPa:n kuormalla osuus oli enää 5 % kun ödometrirenkaan sisäpuoli oli voideltu silikonirasvalla (kuten näissä kokeissa) (Kohonen, 1987).



Kuva 5.8. Huokospaineen käyttäytyminen ödometrikokeen portaissa



Kuva 5.9. Huokospaineen ja lisätyn jännityksen suhteen käyttäytyminen ödometrikokeen portaissa

### 5.3.2 Kirjallisuustutkimus vastaavista kokeista

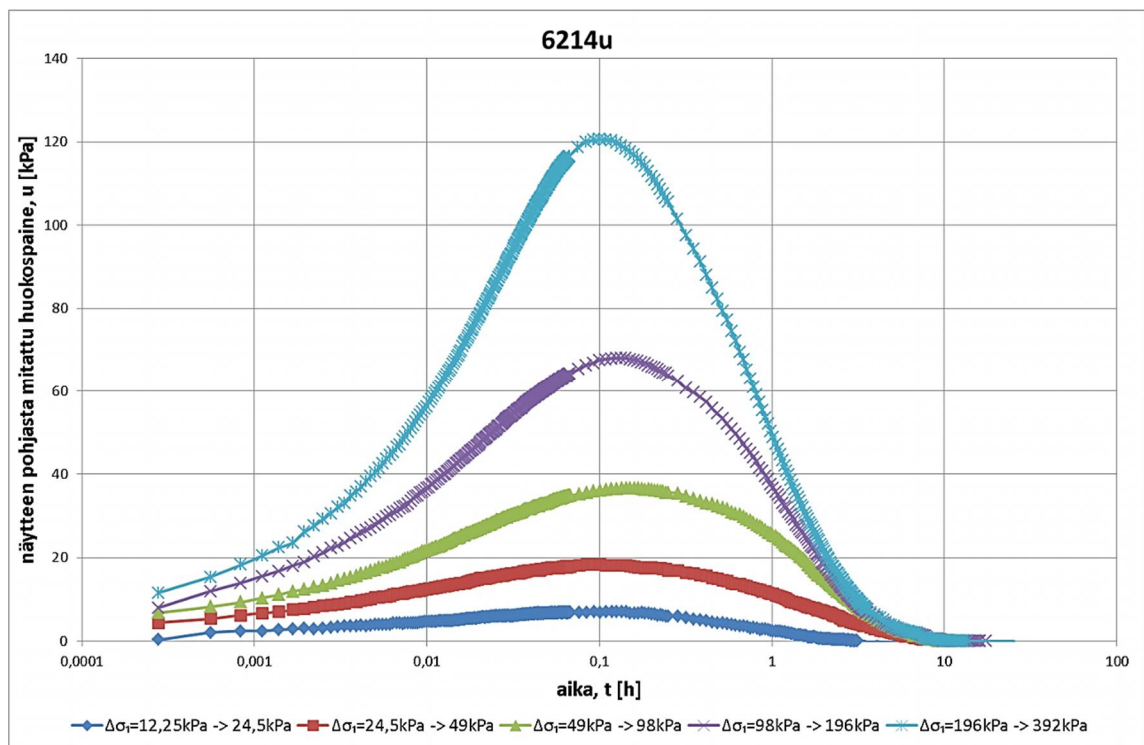
Ensimmäisistä kokeista saadut tulokset olivat hyvin ristiriitaisia klassisten oletusten mukaan. Klassisesti oletetaan lisätyn jännityksen siirtyvän heti ja kokonaisuena huokospaineelle. Ensimmäisistä kokeista saatuja mittaustuloksia ei kuitenkaan tyrmätty vaan pyrittiin löytämään vastaavanlaisia tutkimuksia, joitten tuloksia voitaisiin verrata saatuihin tuloksiin.

Vastaavanlaisia tutkimuksia löytyikin useita kappaleita (Taylor 1942, Whitman 1960, Healy 1960, Whitman 1961, Gibson 1963, Berre 1972, Shogaki 1993, Yan-xu 2005). Useassa tutkimuksessa oli havaittu samanlainen aikaviive jännityksen lisäyksen ja huokospaineen maksimin saavuttamisen välillä. Tätä aikaviivettä oli myös tutkittu ja koitettu selvittää mistä se johtui. Yleinen oletus oli, että joko näyte ei ollut täysin vedellä kylästynyt tai että näytteen ja huokospaineanturin välille oli jäänyt ilmaa, esim. huokoskiviin. Huokosvedenpainetta mitatessa tulee järjestelmän muodonmuutosten olla hyvin pienet, sillä tilavuudenmuutokset pienentävät mitattua painetta. Huokoskiven, sellin ja veden muodonmuutokset kuormaa lisätessä ovat hyvin pieniä. Ilma sen sijaan puristuu kasaan ja jos järjestelmään olisi jäänyt ilmaa, se alentaisi mitattuja huokosvedenpaineen arvoja. Löytyneet vastaavat tutkimukset oli tehty rakennetuilla näytteillä, mikä poikkeaa tässä työssä tehdyistä tutkimuksista. Lisäksi useimmissa myös oletettiin automaattisesti, että saadut tulokset ovat väärin koska ne ovat ristiriidassa klassisten oletusten kanssa, klassisten oletusten oikeellisuutta ei oikeastaan kyseenalaistettu useimmissa. Tämä johtaa siihen kritiikin puutteeseen tuloksissa, jotka vastaavat klassista teoriaa. Yhdessä vastaavassa tutkimuksessa (Healy 1960) rakennettiin uudenlainen ödometriselli, josta oli helpompi poistaa ilma, koska aikaviiveen oletettiin johtuvan ilmasta järjestelmässä. Uudella sellillä aikaviive saatiin minimaaliseksi, kuitenkin sellin rakenne saattoi hyvin vaikuttaa tulokseen. Sellissä huokosvedenpainemittausalue ulottui näytteen reunaan asti, näytteen ja sellin rajapinnassa esimerkiksi vedenpaine voi välittyä huomattavasti helpommin.

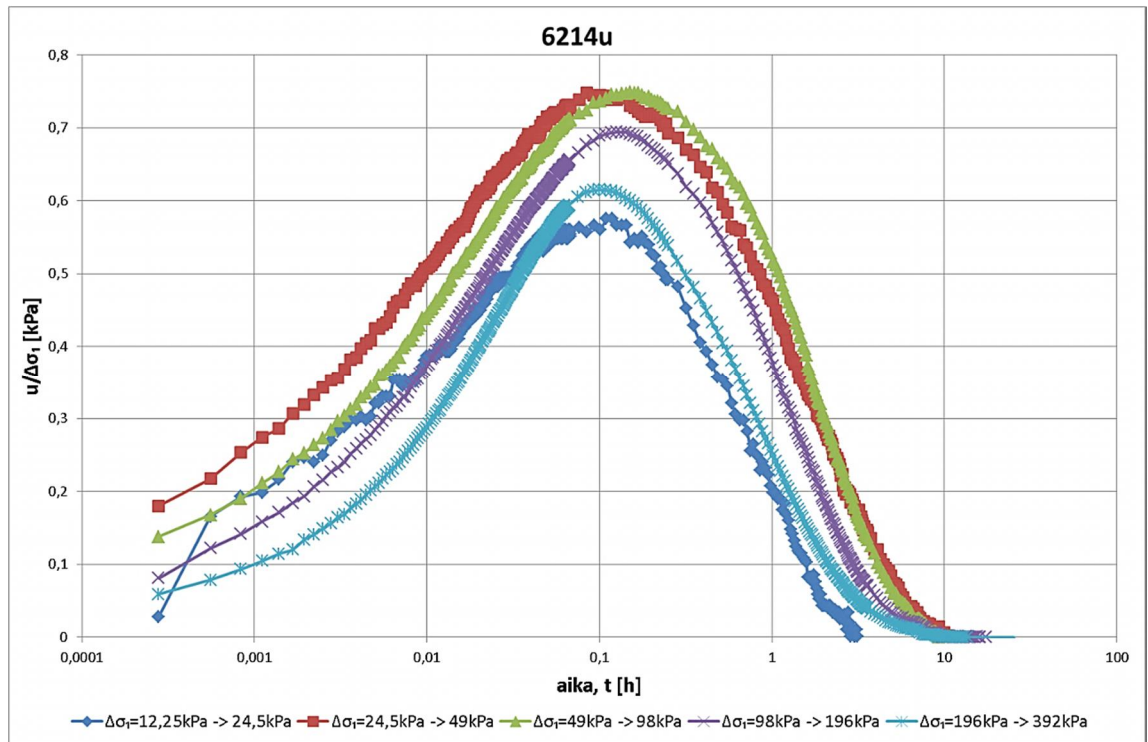
### 5.3.3 Huokoskivien ja sellin ilmaus ja muutokset tuloksissa

Kirjallisuustutkimuksen pohjalta kuitenkin päätettiin kokeilla huokoskivien ilmausta. Kokeet suoritettiin muuten samalla tavoin kuin aikaisemmat, mutta huokoskivet käytettiin tyhjiössä ja pidettiin veden alla kunnes asennettiin selliin. Kuvissa 5.10 ja 5.11 on esitetty huokospaineen käyttäytyminen yhdessä kokeessa, jossa huokoskivet ilmattiin. Aikaisemmissa kokeissa havaittu noin 15 minuutin aikaviive lyheni noin kuuteen minuuttiin, huokospaineen käyrän muodon pysyessä hyvin samana. Myös huokospaineen poistumiseen kokonaan kulunut aika pysyi hyvin samansuuruisena noin 10 tunnissa. Kuvasta 5.11 voidaan havaita, että huokospaineen maksimin ja lisätyn jännityksen välinen suhde kasvoi etenkin suuremmilla jännitysportailla aikaisempiin kokeisiin verrattuna.

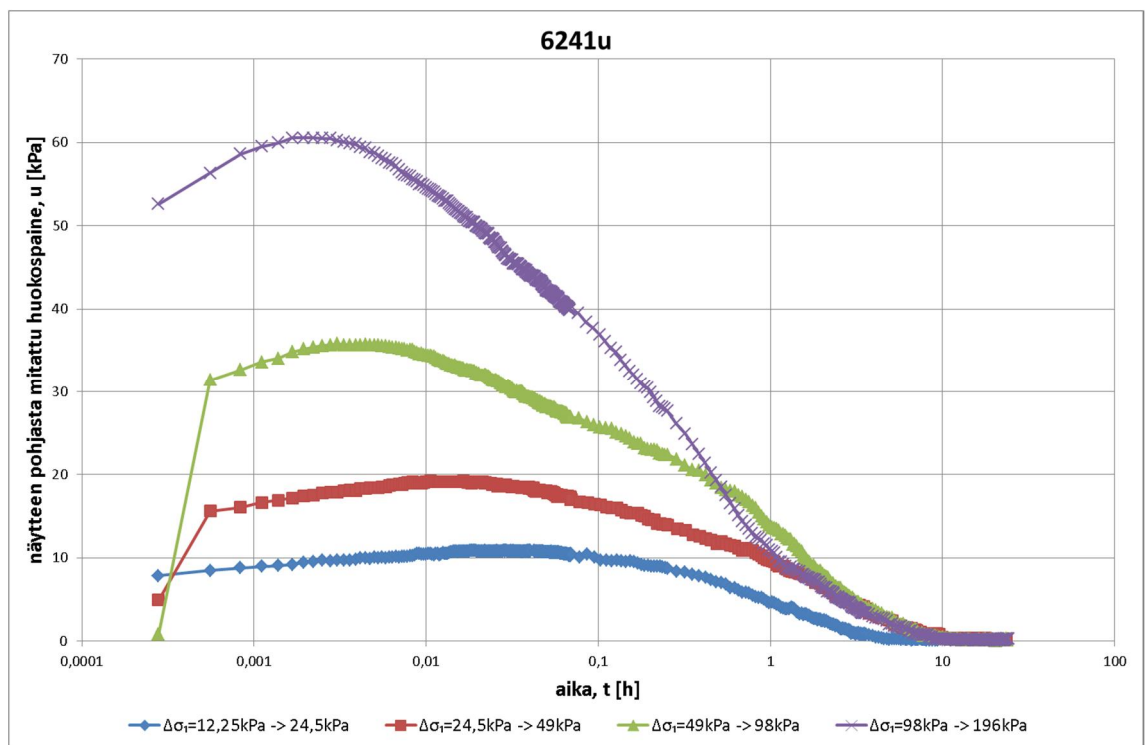
Huokoskivien ilmauksen jälkeen kokeiltiin myös ilmata huokoskivet ja selli ennen koetta. Koejärjestelyt olivat muuten identtiset aiempien vanhempien kokeiden kanssa. Mitattu huokospaineen käyttäytyminen portaattain yhdessä näistä kokeista on esitetty kuvissa 5.12 ja 5.13. Kuvasta 5.12 nähdään, että aikaviive huokospaineen maksimin saavuttamiseen on lyhentynyt vieläkin, jopa vain noin 10 sekuntiin. Kuvasta kuitenkin huomataan, että huokospaineen käyrän muoto on muuttunut aiempiin kokeisiin verrattuna, muoto myös vaihtelee hieman portaiden välillä. Kuvasta 5.13 nähdään huokospaineen maksimin ja lisätyn jännityksen välisen suhteen jopa hieman huonontuneen aikaisempaan verrattuna. Lisäksi suhde selvästi pienenee mitä suurempi jännityksen lisäys on kysymyksessä. Tämä voisi kertoa pienestä vuodosta kokeessa, mutta tällaista ei visuaalisesti havaittu portaattain aikana.



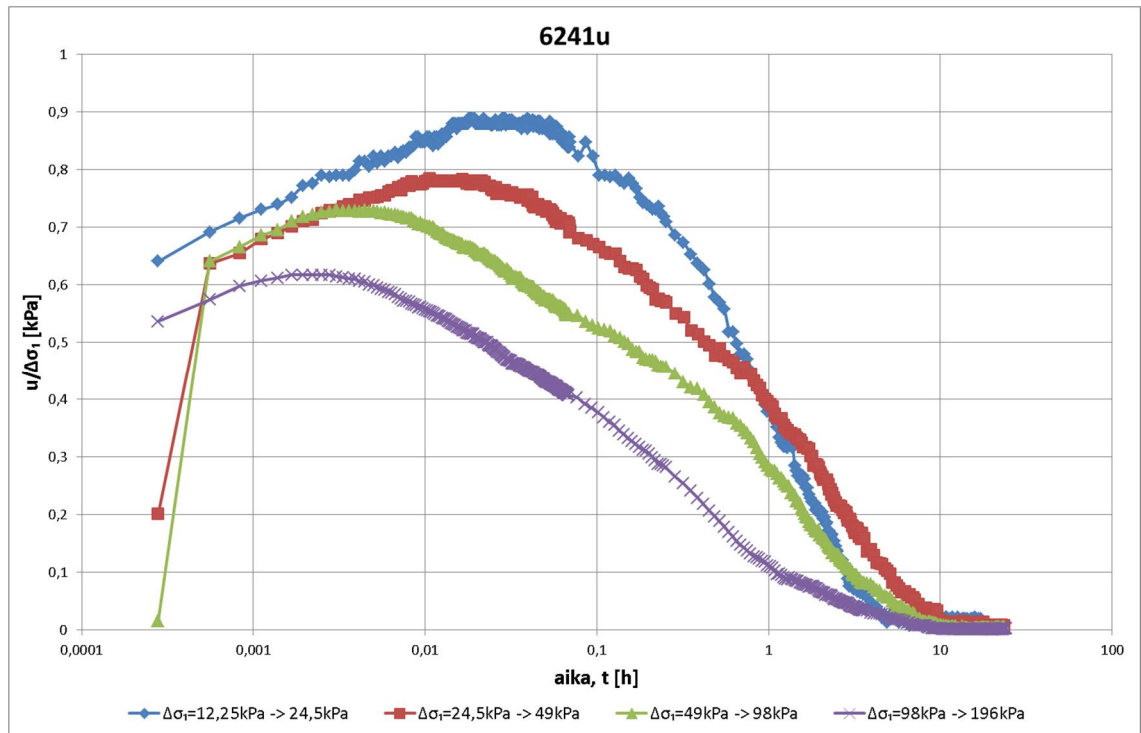
Kuva 5.10. Huokospaineen käyttäytyminen ödometrikokeen portaissa, huokoskivet ilmatu



Kuva 5.11. Huokospaineen ja lisätyn jännityksen suhteen käyttäytyminen ödometrikokeen portaissa, huokoskivet ilmattu

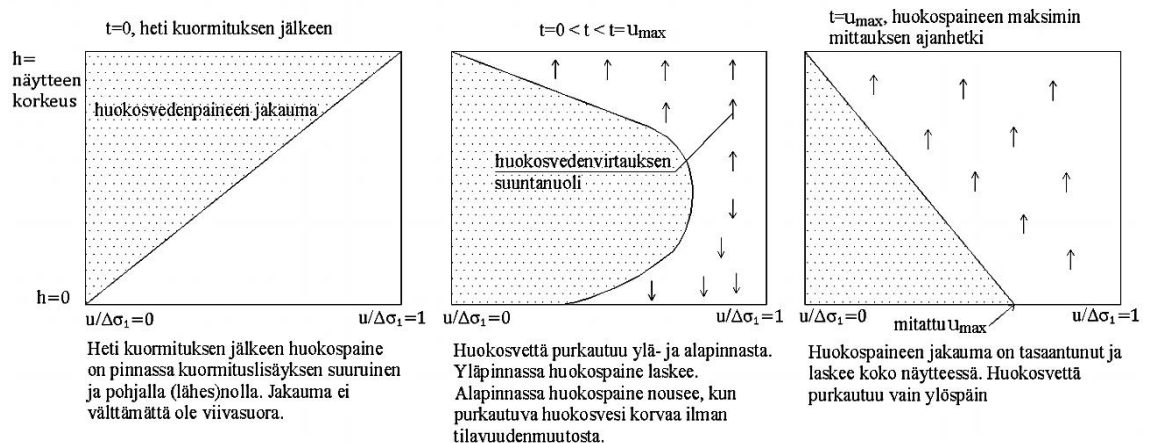


Kuva 5.12. Huokospaineen käyttäytyminen ödometrikokeen portaissa, huokoskivet ja selli ilmattu



Kuva 5.13. Huokospaineen ja lisätyn jännityksen suhteen käyttäytyminen ödometrikokeen portaisissa, huokoskivet ja selli ilmattu

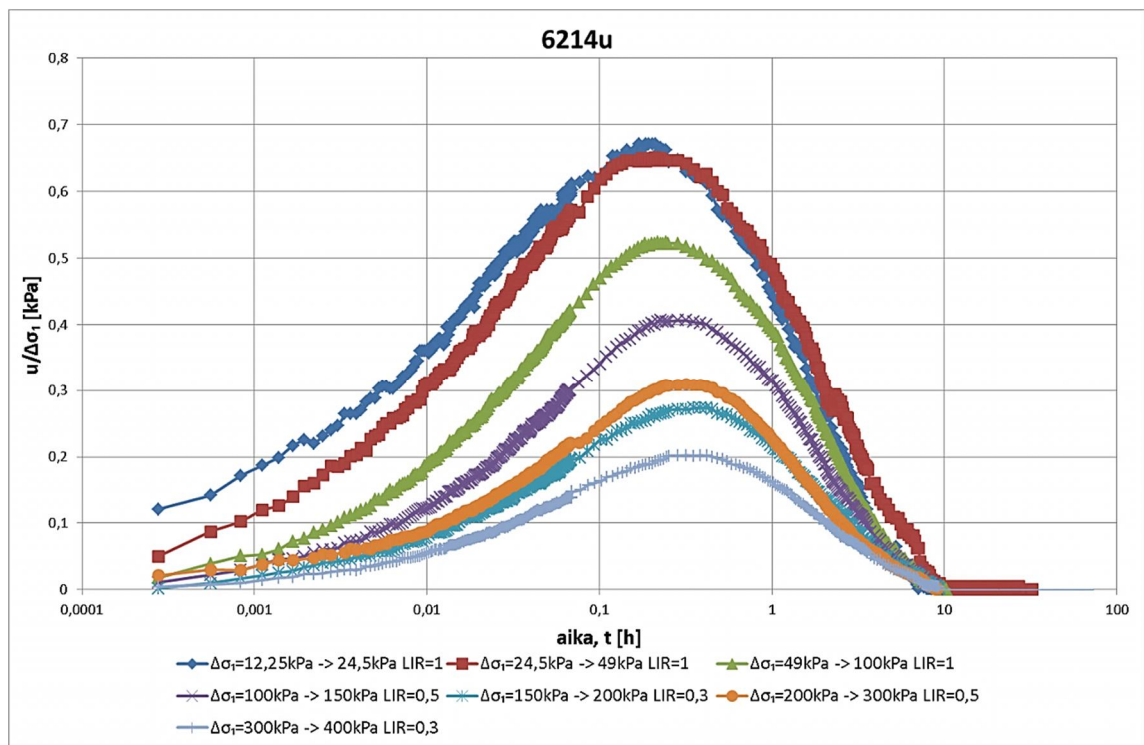
Saaduista tuloksista voidaan arvella, että huokoskiviin olisi aikaisemmissa kokeissa jäänyt ilmaa, joka vaikutti mitattuihin huokosvedenpaineen arvoihin. Järjestelmään jääneen ilman vaikutus voidaan havaita kahdella tavalla saaduista tuloksista. Järjestelmään jäänyt ilma on näytteen alapuolella, näytteen ja huokospaineanturin välisessä suljetussa systeemissä. Koska ilma puristuu kasaan, tilavuus järjestelmässä ei pysy vakiona ja näytteestä pitää virrata ilman tilavuudenmuutoksen verran vettä suljettuun systeemiin. Koska veden virtaus tapahtuu hitaasti, myös mitattu huokospaine kasvaa hitaasti. Samalla näytteen yläpäästä jännityksen synnyttämä huokosvedenpaine purkautuu koko ajan pois. Näytteestä siis poistuu huokosvettä, huokosveden painetta, kahteen suuntaan. Näytteen alapäässä huokosvedenpaine kasvaa ja yläpäässä pienenee, kun nämä ilmiöt kohtaavat toisensa alkaa huokosvedenpaine laskea kokonäytteessä yläpintaan päin. Tätä tapahtumaketjua on kuvattu kuvassa 5.10. Aikaviiveen lisäksi ilma vaikuttaa mitattuun huokosvedenpaineen maksimiarvoon. Kuormituksen jälkeen huokosvesi on päässyt purkautumaan ulos näytteen yläpinnasta ja huokospaine näytteen yläosassa on alentunut, jolloin huokospaine näytteen pohjassa ei voi nousta yhtä suureksi kuin jännityksen lisäys.



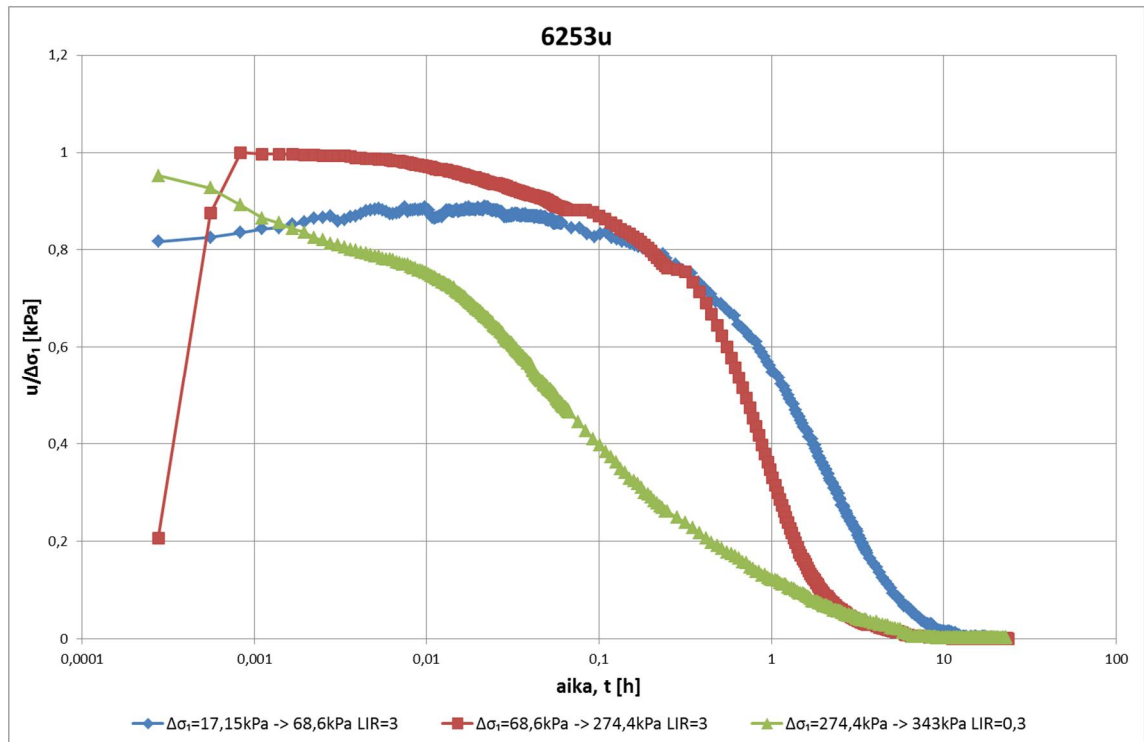
Kuva 5.14. Arvioitu huokosvedenpaineen käyttäytyminen kuormitusportaan aikana



Vaikka ensimmäisissä kokeissa mahdollisesti oli jäänyt ilmaa systeemiin, joka vaikutti huokospaineen mittaukseen, ei ilma luultavasti ole ainoa selitys ilmiöille. Mittaustuloksiin on voinut vaikuttaa niin virheet näytteen asentamisessa kuin virheet laitteistossa. Myös näytteiden ikä saattaa vaikuttaa. Kaikki näytteet on otettu samasta putkesta. Koska yhteen kokeeseen menee yleensä yli viikkokin, on viimeisissä kokeissa käytetty näyte yli kaksi kuukautta vanhempi. Näytteen vanhenemisen merkitystä huokospaineen käyttäytymisessä ei tunneta tarpeeksi, että voitaisiin tehdä johtopäätöksiä. Parasta tietysti olisi käyttää vain tuoreita näytteitä. Lisäksi tulee ottaa huomioon luonnontilaisen maan ominaisuudet. Kahdessa kokeessa kuormitussuhdetta vaihdeltiin, toisessa kokeessa tehtiin portaita joissa LIR oli alle yksi ja toisessa yli ja alle yksi. Kuvassa 5.15 on esitetty huokospaineenkäyttäytyminen kuormitusportaissa, joissa osassa LIR on alle 1. Kuvasta selvästi nähdään, että pienemmällä kuormituksen lisäyksellä myös saavutettu huokospaineen maksimin ja lisätyn jännityksen suhde pienenee. Toisaalta kuvassa 5.16 on esitetty myös yhtä suuremmalla LIR suhteella tehtyjä kokeita, suurella kuorman lisäyksellä pohjalta mitattu huokospaine kasvaa yhtä suureksi lisätyn kuorman kanssa. Tämä antaisi viitteitä jonkinlaisesta rakenteellisesta lujuudesta savella. Voi olla, että normaaleilla LIR=1 kuormitussuhteilla lisättävä jännitys ei riko saven rakennetta. Jos rakenne rikkoutuu, se tapahtuu hitaasti, jonka vuoksi myöskään huokospaine näytteen pohjalle ei nouse heti suureksi. Taylor esitti vuonna 1942 konsolidaatioteorian, joka otti huomioon saven rakenteellisen lujuuden. Teoriassa savelle oletettiin rakeiden välisestä vetovoimasta koostuvaa sidosvoimaa ja saven viskoosisista ominaisuuksista johtuvaa lujuutta.



Kuva 5.15. Huokospaineen käyttäytyminen eri LIR suhteilla tehdyissä portaissa (LIR ≤ 1)



Kuva 5.16 Huokospaineen ja lisätyn jännityksen suhteen käyttäytyminen eri LIR suhteilla tehdyissä portaissa

### 5.3.4 Painumalajien erottelu

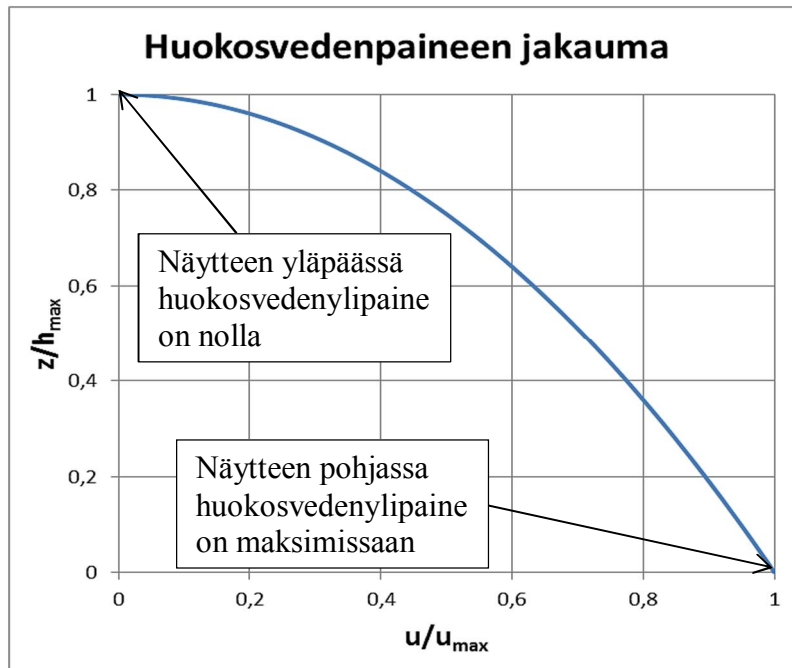
Huokosvedenpaineen mittauksen avulla pystytään ödometrikokeesta arvioimaan veden poistumisesta ja raerungon kokoonpuristumisesta johtuvien painumien suuruutta. Poistuvan huokosveden määrää voidaan arvioida laskennallisesti sekä graafisesti. Laskennallinen tapa perustuu Darcyn lakiin (kaava 2.10). Kaavaa 2.10 voidaan jakaa puolittain näytteen pinta-alalla  $A$ , sillä nyt tarkastellaan näytteen pystysuuntaista muodonmuutosta, saadaan painumanopeudelle  $v$ :lle lauseke

$$v = k \cdot i \quad (5.1)$$

jossa gradientti  $i$  on muotoa

$$i = \frac{1}{\gamma_w} \frac{u}{h} \quad (5.2)$$

Ongelma aiheutuu kuitenkin huokosvedenpaineen jakaumasta näytteessä. Paine ei ole jakautunut tasaisesti näytteen pystysuunnassa vaan aivan näytteen pinnassa, se on nolla ja kasvaa siitä pohjalla mitattuun arvoon. Erilaisia huokospaineen jakaumamalleja on esitetty useita, mutta tässä tapauksessa käytetään toisen asteen yhtälöä kuvaamaan huokospaineenjakaumaa näytteessä kuvan 5.17 mukaisesti.



Kuva 5.17. Arvio huokospaineenjakaumalle näytteessä,  $z$  on etäisyys näytteen pohjasta ylöspäin laskien,  $h_{\max}$  on näytteen korkeus,  $u$  on huokosvedenylipaine ja  $u_{\max}$  on näytteen pohjalta mitattu huokosvedenpaine.

Kuvan 5.2 mukainen arvioitu huokosvedenpaineen jakauma noudattaa kaavaa 5.3

$$\frac{z}{h_{\max}} = 1 - \left( \frac{u}{u_{\max}} \right)^2 \quad (5.3)$$

joka voidaan kirjoittaa huokosvedenpaineen suhteen muotoon

$$u(z) = \sqrt{2 \left( 1 - \frac{z}{h_{\max}} \right)} \cdot u_{\max} \quad , \quad (0) = u_{\max} \text{ ja } u(h_{\max}) = 0 \quad (5.4)$$

Koska huokosvedenpaine muuttuu näytteen korkeuden funktiona, tulee siitä riippuva hydraulinen gradientti  $i$  integroida näytteen korkeuden suhteen kaavan 5.5 mukaisesti, näin saadaan ajanhetkellä  $t$  vaikuttava keskimääräinen gradientti. Lisäksi kaavan 5.2 suotomatka  $h = h_{\max} - z$ .

$$i = \frac{1}{h_{\max}} \int \frac{u(z)}{\gamma_w \cdot h} = \frac{u_{\max}}{\gamma_w \cdot h_{\max}} \int_0^{h_{\max}} \frac{\sqrt{2 \left( 1 - \frac{z}{h_{\max}} \right)}}{h_{\max} - z} dh = \frac{u_{\max}}{\gamma_w \cdot h_{\max}} \cdot 2 \quad (5.5)$$

Mikäli huokosvedenpainejakaumaa kuvaavan funktion potenssi vaihdetaan esimerkiksi neljänteen tai kuudenteen potenssiin vaihtuu kaavassa 5.5 saatu luku kaksi vastaavasti neljäksi tai kuudeksi. Nyt huokosvedenpaineesta aiheutuva veden virtausnopeus, joka on myös huokosvedenpaineesta aiheutuva painumanopeus, voidaan kirjoittaa muotoon

$$v = k \cdot \frac{u_{\max}}{\gamma_w \cdot h_{\max}} \cdot 2 \quad (5.6)$$

Integroimalla saatua yhtälöä 5.6 ajan ja huokospaineen suhteen saadaan huokosveden poistumisesta johtuva painuma laskettua. Integroimalla voidaan myös ottaa huomioon näytteen vedenläpäisevyyskertoimen muutos kokonaispainuman suhteen. Kokeen alku



kuitenkin muodostaa ongelman, sillä silloin huokosvedenpaineen jakaumaa, joka vaikuttaa gradienttiin, ei tunneta.

Kokeen alkuosassa huokosveden poistumisesta johtuvan painuman suuruutta voidaan arvioida kuvaajasta, jossa vaaka-akselilla on huokospaine ja pystyakselilla näytteen painumisnopeus. Tässä menetelmässä kokeen portaassa mitatusta näytteen korkeudesta (kuva 5.18) lasketaan näytteen painumisnopeus. Näin laskettu painumisnopeus sisältää huokosveden poistumisnopeuden  $v_u$  ja  $v_r$  raerungon hiipumanopeuden (kaava 5.7). Oletetaan Darcyn lain olevan voimassa, jolloin huokosveden poistumisnopeus on kaavan 5.1 mukainen. Suurin huokosveden poistumisnopeuteen vaikuttava tekijä on huokospaine, jolloin nopeutta voidaan approksimoida kaavalla 5.8.

$$v = v_u + v_r \quad (5.7)$$

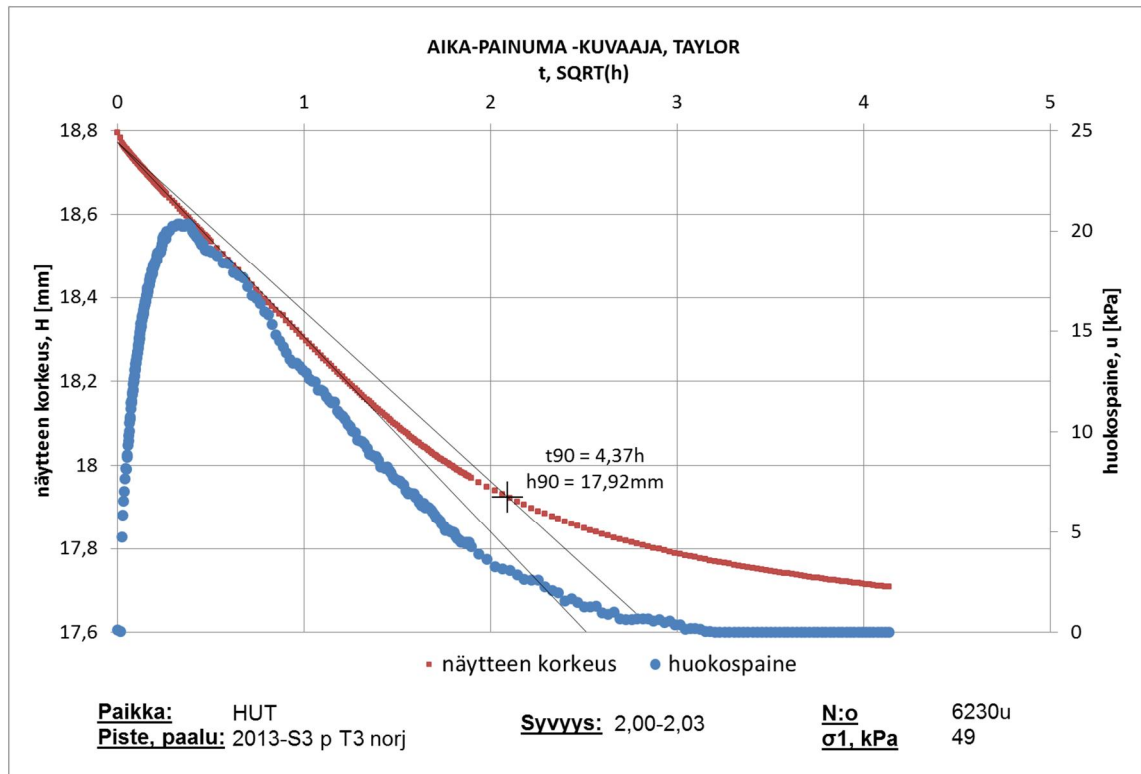
$$v_u = k \cdot u \quad (5.8)$$

missä  $v_u$  on huokosveden poistumisnopeus  
 $v_r$  raerungon hiipumanopeus

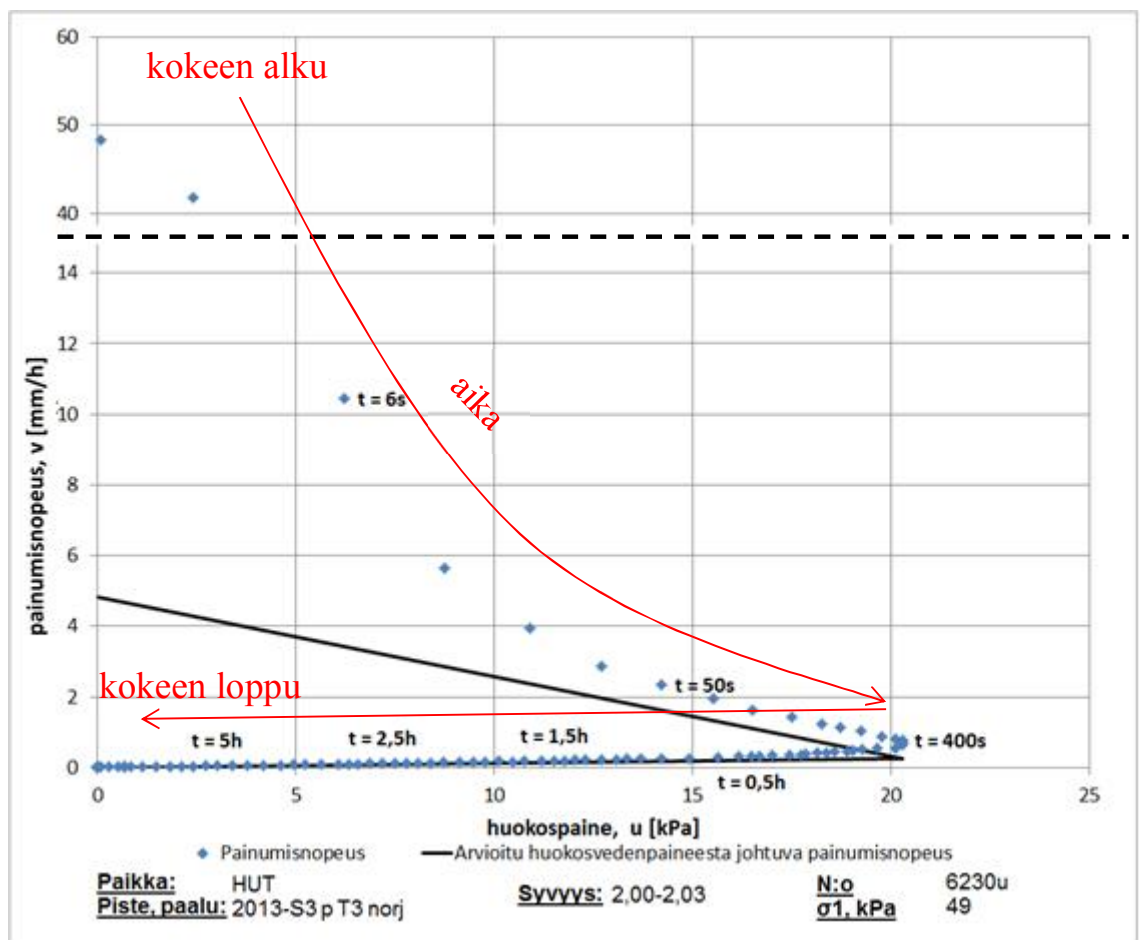
Kuvassa 5.19 on esitetty laskettu kokonaispainumisnopeus ja mitattu huokosvedenpaine ajan suhteen. Kuvaan on piirretty kaksi suoraa, jotka kuvaavat huokosveden poistumisnopeuden maksimiarvoa ja myös laskenta-arvoa. Kuvassa 5.20 esitetään näitten suorien piirtämisperiaate, eli kokeen tulkitseminen. Kokeen tulkitseminen lähtee kohdasta, jossa huokosvedenpaine on laskenut nollaan. Tätä edeltäviin pisteisiin (kuva 5.20 kohta 1.) sovitetaan suora, jonka jälkeen samansuuntainen suora piirretään lähtemään origosta. Jos huokosvedenpaine ei laske nollaan kokeen aikana, suora lähtee origon yläpuolelta. Piirrettyä suoraa jatketaan kunnes saavutaan vaaka-akselilla mitattuun huokosvedenpaineen maksimin arvoon (kuva 5.20 kohta 2.). Tämän jälkeen sovitetaan mitatun huokosvedenpaineen maksimia edeltäviin arvoihin suora, jonka suuntaisella suoralla jatketaan edellisen suoran loppupisteestä (kuva 5.20 kohta 3.). Piirretyt suorat edustavat huokosveden poistumisen suurinta nopeutta. Suorat eivät saakaan nousta havaintopisteiden yläpuolelle. Suorien ja mittauspisteiden väliin jäävä erotus edustaa raerungon hiipumanopeutta.

Integroimalla saadut suorat ajan ja huokosvedenpaineen suhteen saadaan painuma, joka vastaa näytteestä poistuneen huokosveden suuruutta. Lasketun painuman ja mitatun kokonaispainuman erotuksena saadaan raerungon hiipuma. Kokonaispainuma, poistunut huokosvettä vastaava painuma ja raerungon hiipuma on esitetty kuvassa 5.21.

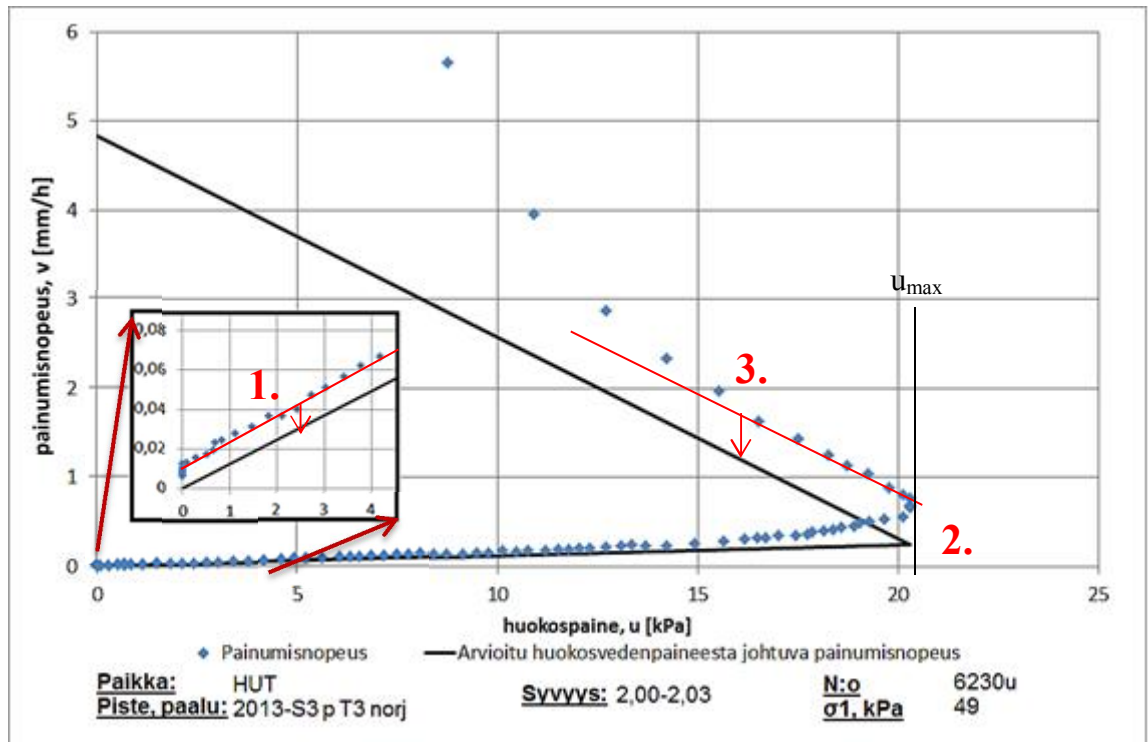
Konsolidaatioteorian mukaan huokosveden poistumisesta johtuvaa painumaa voisi kutsua konsolidaatiopainumaksi ja raerungon hiipumaa sekundääripainumaksi. Klassinen oletus on että sekundääripainuma alkaisi vasta primääri eli konsolidaatiopainuman jälkeen. Tuloksista voidaan kuitenkin heti havaita, ettei tämä pidä paikkaansa. Kuvassa 5.14 esitettiin arvio kuinka huokosvedenpaine jakautuu epätasaisesti näytteessä eri ajanhetkillä. Sekundääripainumakaan ei ala tasaisesti koko näytteessä primäärivaiheen loputtua. Sekundäärivaihe alkaa sitä nopeammin mitä lähempänä ollaan kuivattavaa pintaa, eli mitä nopeammin huokosvedenpaine pääsee purkautumaan. Ja hyvin mahdollisesti jo ennen kuin kaikki huokosvedenpaine on purkautunut tai näytteen pohjalla edes saavuttanut maksimiarvonsa.



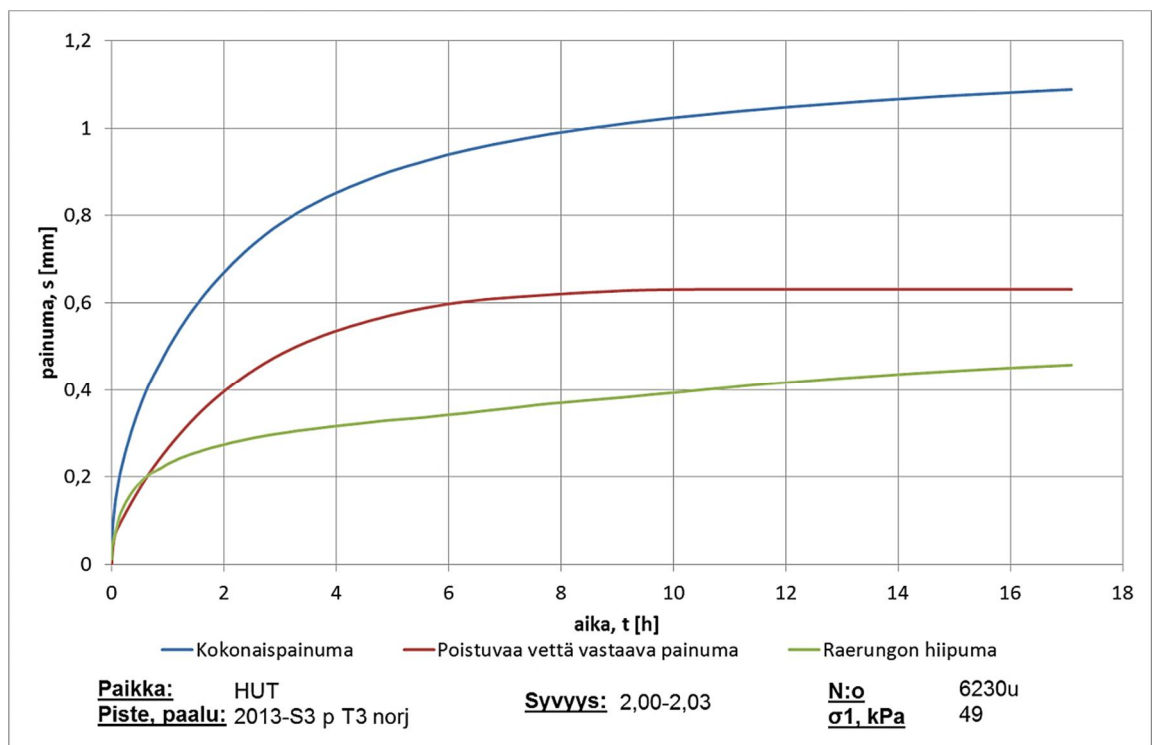
Kuva 5.18. Näytteen pohjasta mitattu huokosvedenpaine ja mitattu näytteen korkeus



Kuva 5.19. Painumisnopeuden ja huokosvedenpaineen suhde kuormitusportaassa



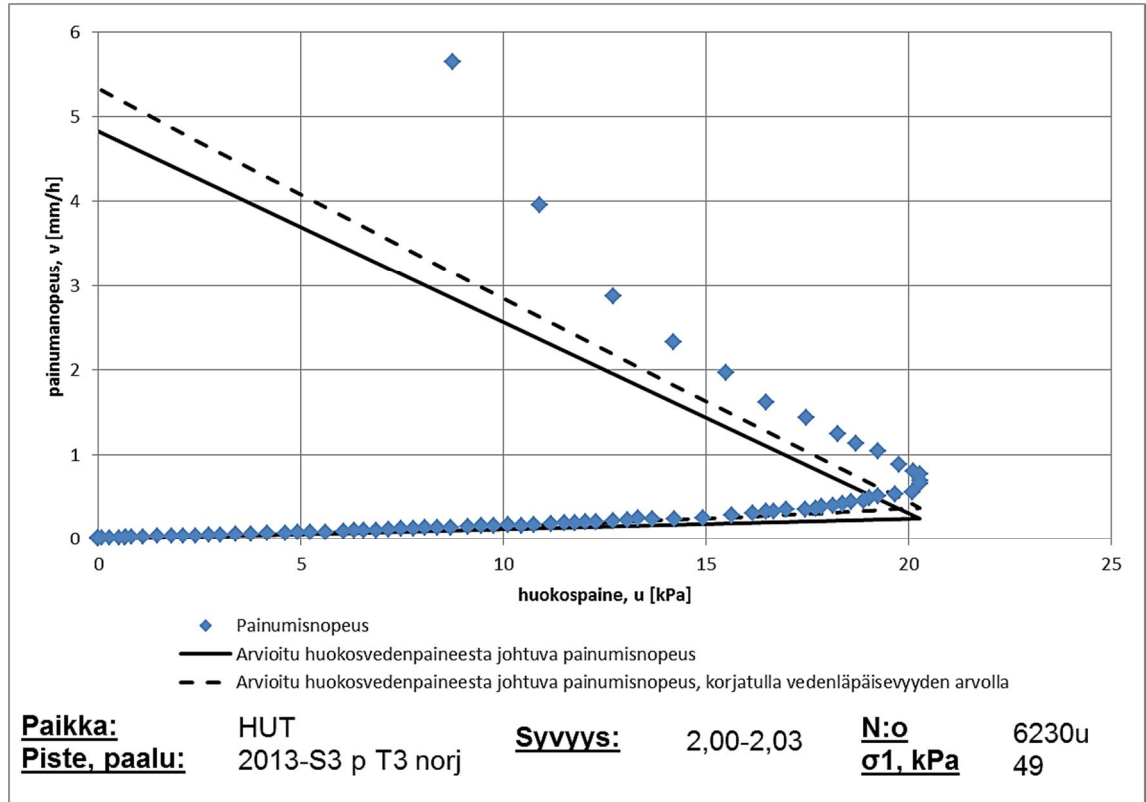
Kuva 5.20. Kokeen tulkitseminen uv-kuvaajasta. Ensin (1.) suora sovitetaan loppupään havaintoihin, jonka jälkeen samansuuntainen suora piirretään lähtemään origosta. Suoraa jatketaan samansuuntaisena havaitun huokospaineen maksimiin (2.). Tästä pisteestä piirretään uusi suora, jonka suunta määräytyy havainnoista, juuri ennen huokospaineen maksimia (3.).



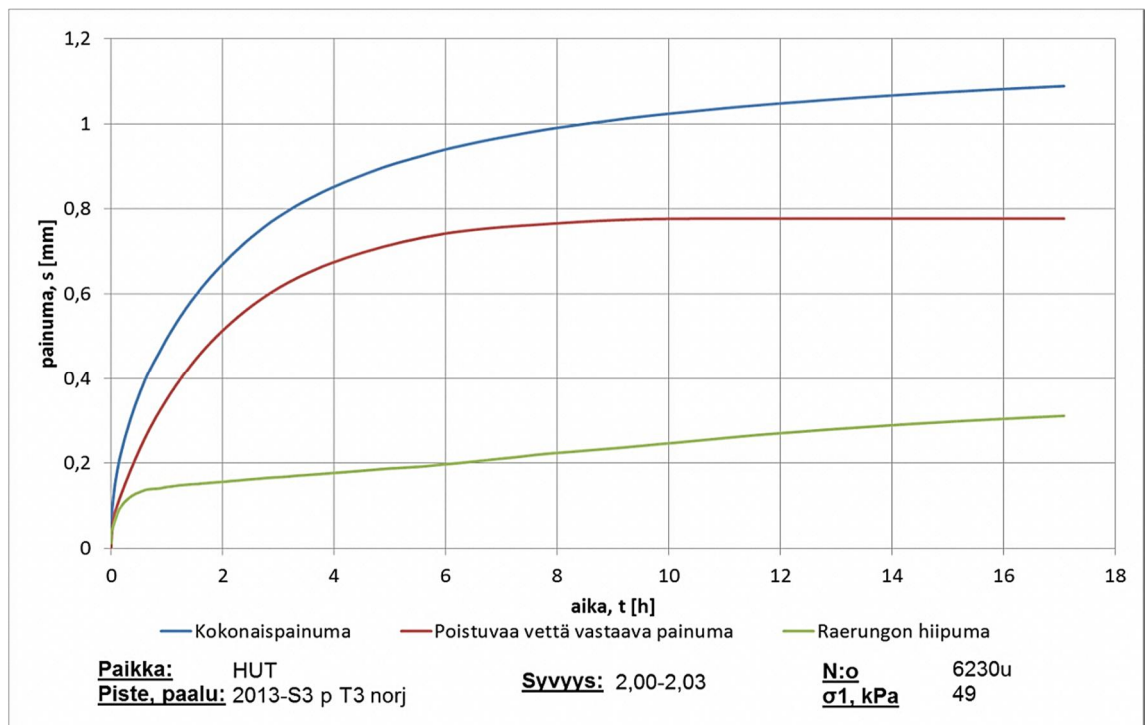
Kuva 5.21. Kokonaispainuma ödometrikoeportaassa ja painuman erottelu näytteestä poistuvaa vettä vastaavaksi painumaksi ja raerungon hiipumaksi.

Edellä selitetyssä menetelmässä veden poistumisnopeuden oletetaan siis olevan suoraan riippuvainen huokosvedenpaineen arvosta. Veden poistumisnopeuteen vaikuttaa myös varmasti näytteen vedenläpäisevyyskerroin, joka muuttuu näytteen muodonmuutoksen takia. Vedenläpäisevyyden ja näytteen pystysuuntaiseen muodonmuutoksen suhde li-

nearisoituu puolilogarytmisessä koordinaatistossa (kuvat 5.4 ja 5.5). Tämän lineaarisen yhteyden avulla, voidaan myös laskea vedenläpäisevyyden muutos näytteessä mitatun näytteen korkeuden avulla ja soveltaa sitä edellä selitettyssä menetelmässä piirrettyihin kahteen suoraan (kuva 5.22). Näytteen vedenläpäisevyyden muutoksen suhteen korjattua veden poistumisnopeutta kuvaavaa suoraa integroimalla huokospaineen ja ajansuhteen, saadaan jälleen näytteestä poistuvaa vettä vastaava painuma. Kokonaispainuma, veden poistumaa vastaava painuma ja näiden erotus on esitetty kuvassa 5.23.



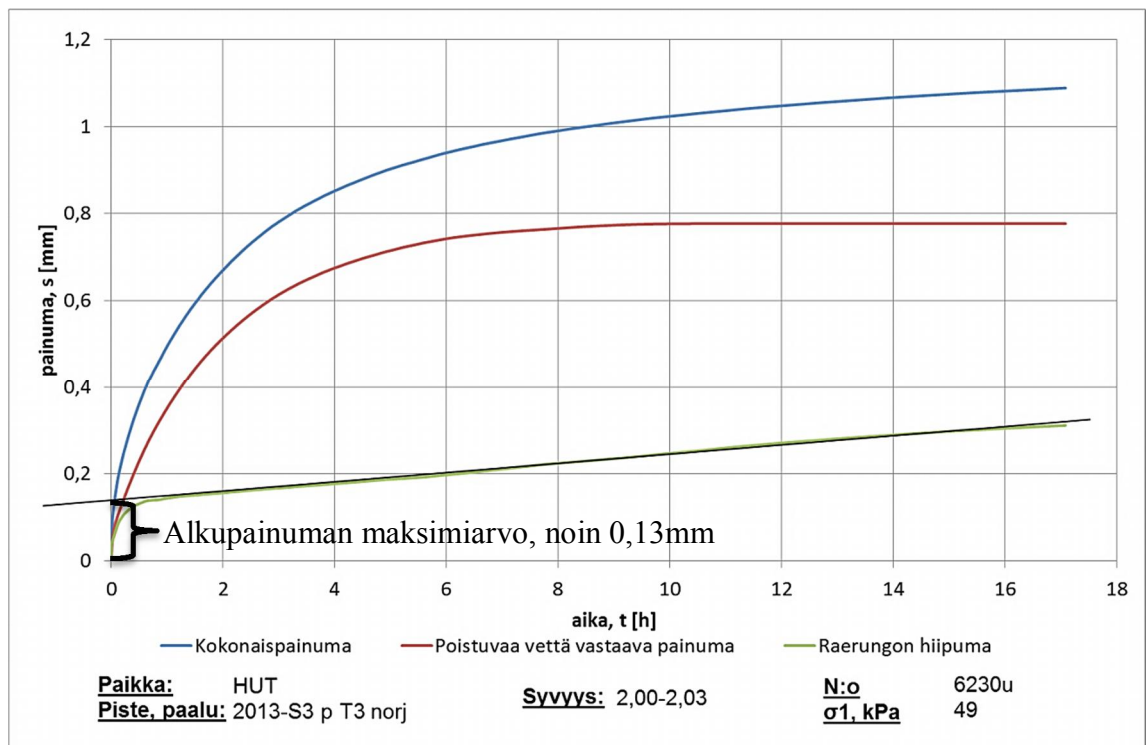
Kuva 5.22. Näytteen muodonmuutoksen suhteen korjatut vedenläpäisevyyden suorat



Kuva 5.23. Kokonaispainuma ödometrikoeportaassa ja painuman erottelu näytteestä poistuvaa vettä vastaavaksi painumaksi ja raerungon hiipumaksi.

Vertaamalla kuvia 5.21 ja 5.23 huomataan, että korjaamalla vedenläpäisevyyttä seuraa kasvu arvioidussa huokosvedenpaineesta johtuvassa painumisnopeudessa (kuva 5.22), painumakäyrien keskinäinen suhde ja painumakäyrien muoto muuttuu. Siitä kumpi käyrien muoto on oikea tai pitäisikö painumien keskinäinen suhde olla erisuuruinen ei ole varmaa tietoa.

Etenkin kuvassa 5.23 voidaan huomata rearungon hiipuman olevan lähes lineaarinen kokeen alun jälkeen lineaarisessa koordinaatistossa. Raerungon hiipuman loppupäähän sovitetun suoran avulla voidaan arvioida näytteessä tapahtunutta suurinta alkupainuman arvoa (kuva 5.24). Suurin alkupainuman suuruus on suoran painuma-akselin leikkauspiste, eli tässä kokeessa noin 0,13 mm.



Kuva 5.24. Alkupainuman maksimiarvon määrittäminen

## 6 Konsolidoidut kolmiaksiaalikoheet

### 6.1 Perustiedot kokeista

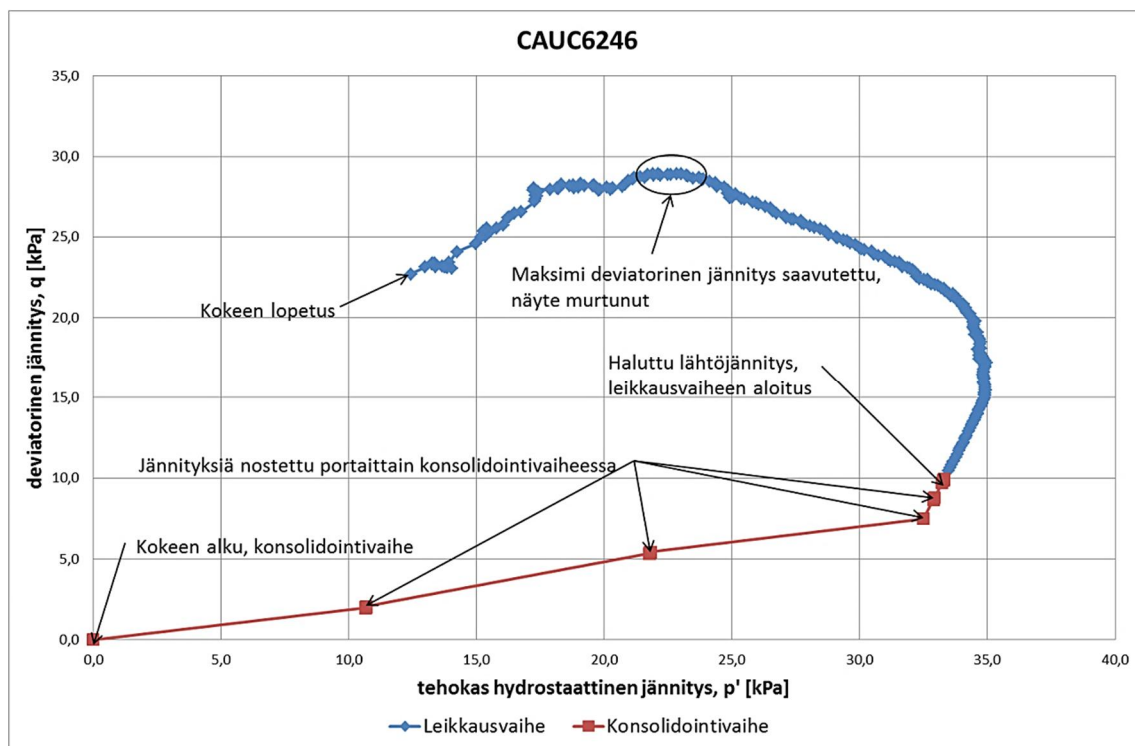
Työn aikana suoritettiin yhteensä 15 kolmiaksiaalikoetta, joista 7 oli avoimia, 5 suljettuja ja 3 näiden yhdistelmiä. Avoimessa kokeessa näytteeseen syntyvä huokospaine pääsee purkautumaan pois näytteestä ja näytteestä poistuva vesi mitataan, joka on suoraan näytteen tilavuuden muutos. Suljetussa kokeessa huokospaine ei pääse purkautumaan eikä tilavuuden muutosta tapahdu.

Kolmiaksiaalikokeen koenimeen vaikuttaa konsolidoiminen, missä tilassa koe suoritetaan ja miten näytettä kuormitetaan. Koenimen kolme ensimmäistä kirjainta pätevät myös kansainvälisesti. Koenimi koostuu 3-4 isosta kirjaimesta seuraavalla tavalla

- ensimmäiset kaksi kirjainta tulee konsolidoimistavasta. Isotrooppista konsolidointia vastaa lyhenne CI (Isotropic consolidation) ja anisotrooppista konsolidointia lyhenne CA (anisotropic consolidation)
- kolmas kirjain kertoo onko kokeen leikkausvaihe suoritettu suljetussa tilassa vai avoimessa tilassa. Suljettua tilaa vastaa kirjain U (undrained) ja avointa tilaa kirjain D (drained)
- mikäli kokeessa on pakotettu pystysuuntainen muodonmuutos, neljäs kirjain kertoo näytteen muodonmuutoksen suunnan. Jos näytettä puristetaan kasaan, kirjain on C (compression), tai jos näyte laajenee pystysuunnassa, kirjain on E (extension)

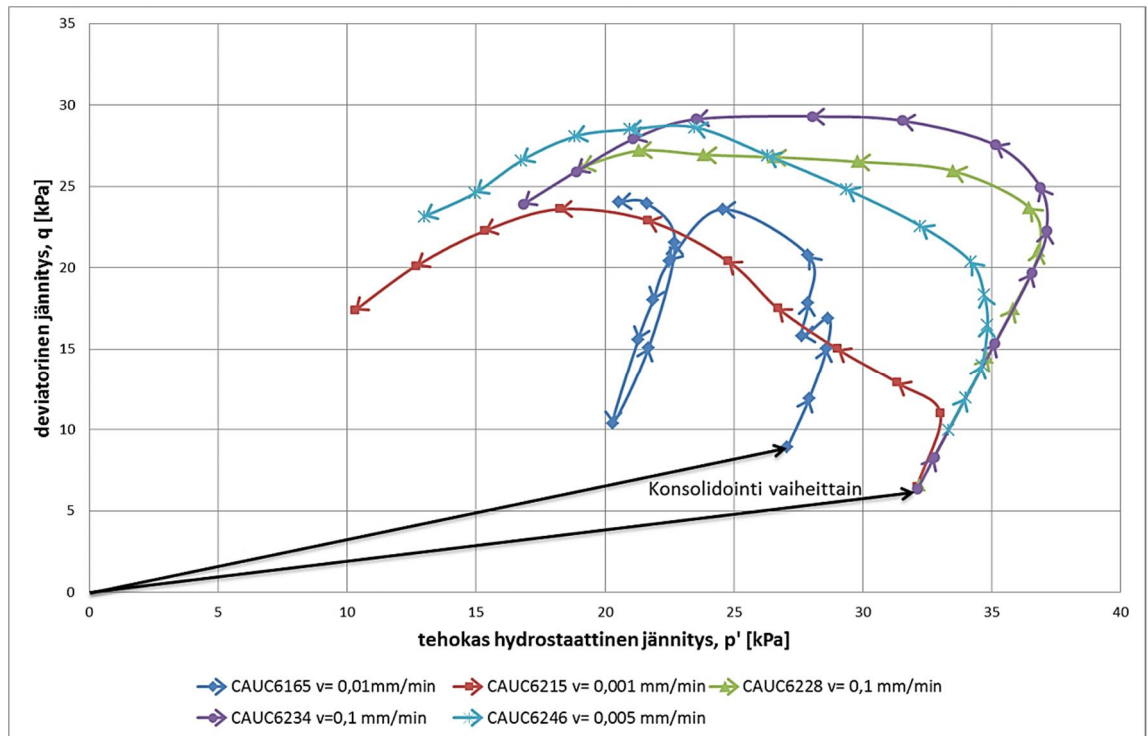
Nämä nimeämisehdot pätevät pääosin yleisesti, mutta joskus viimeistä C tai E-kirjainta käytetään, vaikkei kyseessä olisi vakio muodonmuutoksella leikattu koe. Edellisten ehtojen lisäksi tässä työssä on käytetty nimeä CADU, joka pätee kokeisiin, joissa leikkausvaiheessa on sekä avoimia ja suljettuja portaita.

Kolmiaksiaalikoetta suoritetaan yleensä kahdessa vaiheessa, konsolidointi- ja leikkausvaiheessa. Konsolidointivaiheessa näyte altistetaan halutulle pysty- ja vaakajännityksen, eli sellipaineen arvolle yleensä avoimessa tilassa. Jännitysten lisääminen haluttuihin arvoihin voi tapahtua monessa portaassa (kuva 6.1), lisäämällä jännityksiä vain osa halutusta lopullisesta. Konsolidointi voidaan tehdä isotrooppisesti, jolloin pysty- ja vaakajännitys ovat yhtä suuret tai anisotrooppisesti, jolloin pysty- ja vaakajännitys eroavat toisistaan. Kun näyte on halutussa jännitystilassa, sen annetaan konsolidoitua niin kauan, että muodonmuutoksia ei enää tapahdu tai muodonmuutosnopeus on todella pieni. Tästä jännitystilasta, lähtöjännityksestä, aloitetaan leikkausvaihe (kuva 6.1), jossa näytettä kuormitetaan halutulla tavalla, yleensä niin kauan, että näyte murtuu (kuva 6.1). Savella murtuminen tarkoittaa yleensä, että jännitys näytteessä ei enää kasva vaan pysyy melko vakiona tai pienenee ja näytteen muodonmuutokset kasvavat suuriksi.

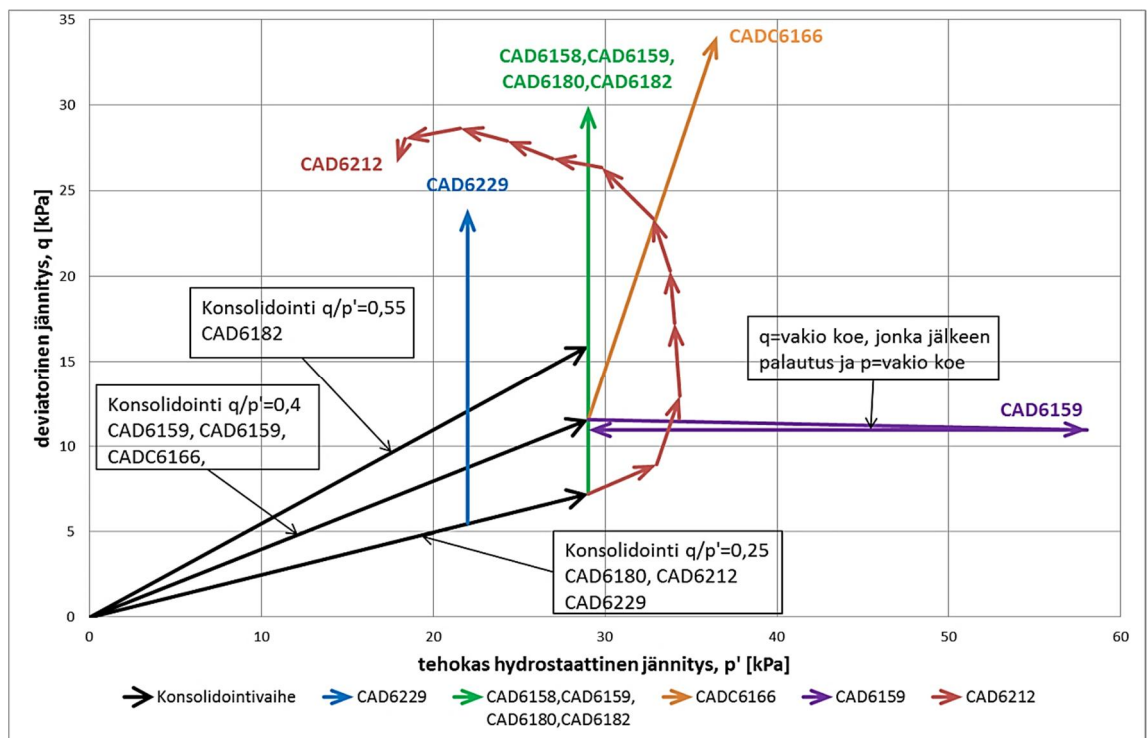


Kuva 6.1. Esimerkki anisotrooppisesti konsolidoidun kolmiaksaalikokeen vaiheista

Kolmiaksaalikokeessa pystysuuntaista jännitystä voidaan muuttaa kahdella eri tavalla. Jännitystä voidaan muuttaa suoraan esimerkiksi ilmanpaineen tai painojen avulla, jolloin näytteessä tapahtuu vapaasti muodonmuutoksia. Toinen tapa muuttaa pystysuuntaista jännitystä on pakottamalla näytteeseen pystysuuntainen muodonmuutos. Kun näytteeseen pakotetaan muodonmuutos, se käyttäytyy kuin jousi vastustaen muodonmuutosta jännityksellä, joka kasvaa kunnes näyte murtuu. Pakotetusta muodonmuutoksesta syntynyttä jännitystä ei kuitenkaan pystytä säätämään tarkasti tai tietämään ennalta. Kaikki eri jännitystilat, -pisteet, joissa kokeen aikana käydään muodostavat kolmiaksaalikokeen jännityspolun. Jännityspolku kuvataan yleensä  $p'$ - $q$ -koordinaatistossa, kuvassa 6.1 on esitetty tyypillinen suljetun kokeen jännityspolku. Kuvissa 6.2, 6.3 ja 6.4 on esitetty tässä työssä suoritettujen kolmiaksaalikokeiden jännityspolut suurpiirteisesti. Lisäksi kokeiden kuvaukset ja arvioitu onnistuminen on esitetty taulukossa 6.1. Yleensä määritettäessä esimerkiksi lujuusparametreja, tehdään useita eri kokeita eri lähtöjännityksillä. Kun kaikki leikkausvaiheen jännityspolut (suljetussa kokeessa konsolidointivaihetta ei usein piirretä) piirretään samaan kuvaajaan, voidaan määrittää esimerkiksi kitkakulma ja koheesio.

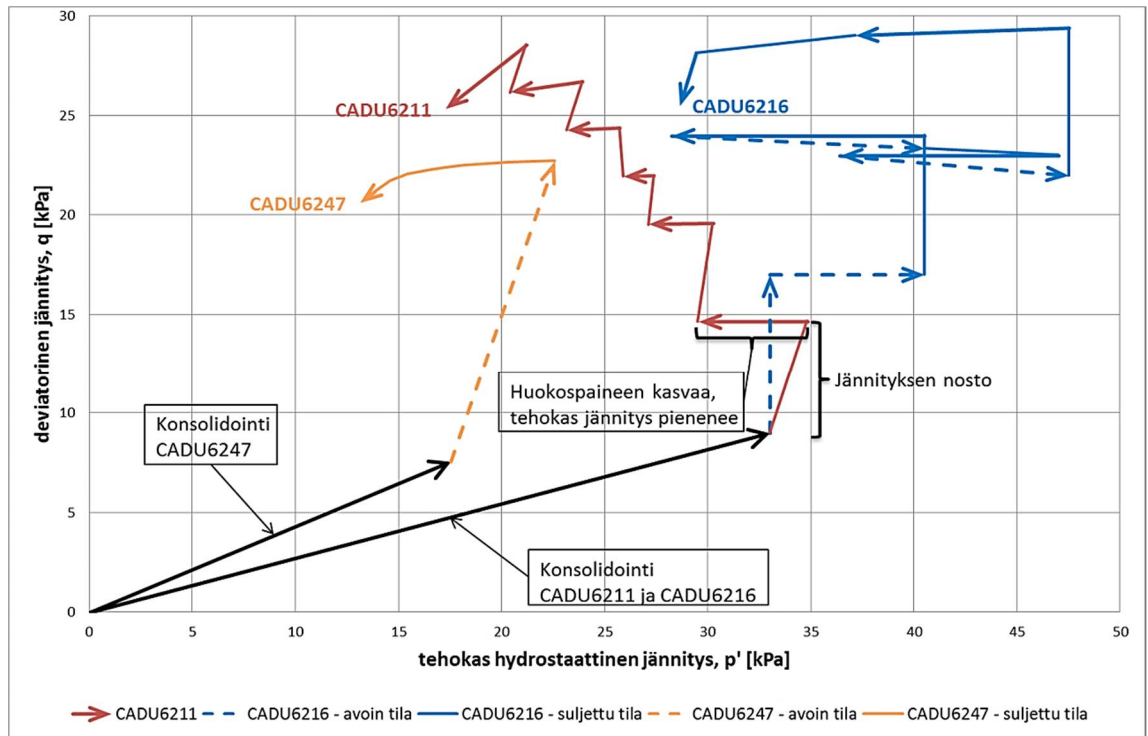


Kuva 6.2. Suljettujen, vakio muodonmuutoksella leikattujen anisotrooppisesti konsolidoitujen kolmiaksaalikokeiden jännityspolut



Kuva 6.3. Avoimien anisotrooppisesti konsolidoitujen kolmiaksaalikokeiden jännityspolut





**Kuva 6.4. Suljettujen portaittaisten anisotrooppisesti konsolidoitujen kolmiaksaalikokeiden ja portaittaisen yhdistelmä kolmiaksaalikokeen jännityspotut**

**Taulukko 6.1. Häiriintymättömille näytteille tehtyjen anisotrooppisesti konsolidoitujen kolmiaksaalikohteiden kuvaus ja onnistumisen arviointi**

<b>Koe numero</b>	<b>Kokeen kuvaus</b>	<b>Mitä kokeella on pyritty selvittämään</b>	<b>Kokeen onnistumisen arvio</b>
CAD 6158	Portaittainen avoin koe, konsolidoitu $q/p'=0,4$ suhteessa ja leikkausvaiheessa on pyritty pitämään $p'$ vakiona	Murtokuorma, kriittisen tilan arvo, myötöpinnan parametreja	Koe onnistui hyvin ja sitä on käytetty lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointiin
CAD 6159	Portaittainen avoin koe, joka on konsolidoitu samaan pisteeseen kuin CAD6158, mutta kuormitettu tämän jälkeen pitämällä $q$ vakiona. Näyte on palautettu konsolidointi pisteeseen ja murrettu samalla tavalla kuin CAD6158 pitämällä $p'$ vakiona	Kokeessa tutkittiin $q$ =vakio kuormituksen vaikutuksia näytteen ja pyrittiin selvittämään murtokuorma, kriittisen tilan arvo ja myötöpinnan parametreja $p'$ vakio kuormituksesta.	Koe onnistui hyvin ja sitä on käytetty lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointiin
CAUC 6165	Vakio muodonmuutosnopeudella leikattu suljettu koe, $v=0,01\text{ mm/min}$	Murtokuorma, kriittisen tilan arvo, kimokerroin	Koe onnistui hyvin ja sitä on käytetty lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointiin
CADC 6166	Vakio muodonmuutosnopeudella leikattu avoin koe, $v=0,001\text{ mm/min}$	Murtokuorma, kriittisen tilan arvo, kimokerroin	Koe onnistui hyvin ja sitä on käytetty lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointiin
CAD 6180	Kuten CAD6158, mutta näyte on konsolidoitu $q/p'=0,25$ suhteella	Murtokuorma, kriittisen tilan arvo, myötöpinnan parametreja	Koe onnistui hyvin ja sitä on käytetty lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointiin
CAD 6182	Kuten CAD6158, mutta näyte on konsolidoitu $q/p'=0,55$ suhteella	Murtokuorma, kriittisen tilan arvo, myötöpinnan parametreja	Näyte on aivan putken yläpäästä ja kuuluu ainakin vesipitoisuutensa perusteella eri kerrokseen. Kokeesta saatu lujuus on hieman pienempi. Piirretty kuviin, mutta painoarvo pieni
CAU 6211	Portaittainen suljettukoe	Tutkittiin näytteen käyttäytymistä suljetussa tilassa portaittaisessa kuormituksessa. Murtokuorma, kriittisen tilan arvo	Koe onnistui hyvin ja sitä on käytetty lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointiin

Koe numero	Kokeen kuvaus	Mitä kokeella on pyritty selvittämään	Kokeen onnistumisen arvio
CAD 6212	Portaittain avoin koe, jossa pyrittiin matkimaan suljetun vakio muodonmuutosnopeudella leikatun näytteen jännityspolkua.	Tutkittiin näytteen käyttäytymistä, kun avoimessa tilassa seurataan suljetun tilan jännityspolkua. Murtokuorma, kriittisen tilan arvo	Koe onnistui hyvin ja sitä on käytetty lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointiin
CAUC 6215	Vakio muodonmuutosnopeudella leikattu suljettu koe, $v=0,001\text{mm/min}$	Tutkittiin leikkausnopeuden vaikutusta. Murtokuorma, kriittisen tilan arvo	Koe onnistui hyvin ja sitä on käytetty lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointiin
CADU 6216	Portaittain kuormitettua koe, jossa sekä avoimia, että suljettuja portaita leikkausvaiheessa	Tutkittiin $p'$ ja $q$ jännitysten lisäysten vaikutuksia suljetussa ja avoimessa tilassa. Murtokuorma, kriittisen tilan arvo	Koe onnistui hyvin, mutta näytteen vesipitoisuuden perusteella näyte kuuluu eri kerrokseen. Koetta on kuitenkin käytetty muodonmuutosominaisuuksien arviointiin
CAUC 6228	Vakio muodonmuutosnopeudella leikattu suljettu koe, $v=0,1\text{mm/min}$	Tutkittiin leikkausnopeuden vaikutusta. Murtokuorma, kriittisen tilan arvo	Näyte luultavasti häiriintyi asennuksen aikana, eikä koetta ole käytetty lujuusominaisuuksien arviointiin.
CAD 6229	Portaittain avoin koe, joka on konsolidoitu pienemmässä sellipaineessa	Pienemmän konsolidoimisjännityksen vaikutus murtokuormaan ja kriittisen tilan arvoon	Koe onnistui hyvin ja sitä on käytetty lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointiin
CAUC 6234	Vakio muodonmuutosnopeudella leikattu suljettu koe, $v=0,1\text{mm/min}$	Tutkittiin leikkausnopeuden vaikutusta. Murtokuorma, kriittisen tilan arvo	Koe onnistui hyvin ja sitä on käytetty lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointiin
CAUC 6246	Vakio muodonmuutosnopeudella leikattu suljettu koe, $v=0,005\text{mm/min}$	Tutkittiin leikkausnopeuden vaikutusta. Murtokuorma, kriittisen tilan arvo	Koe onnistui hyvin ja sitä on käytetty lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointiin
CAU 6247	Leikkaus suljetussa tilassa, pystysuuntaistakuormaa nostettu huomattavasti, jonka jälkeen odotettu huokospaineen kasvua ja näytteen murtumista	Tutkittiin huokospaineen kasvua pystysuuntaisen kuorman lisäyksen jälkeen. Murtokuorma, kriittisen tilan arvo	Koe onnistui hyvin ja sitä on käytetty lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointiin

## 6.2 Kokeitten tulokset

Kaikista kolmiaksaalikoenäytteistä on tehty luokituskokeita, joitten tulokset löytyvät taulukosta 4.2. Suuren lukumääränsä vuoksi kolmiaksaalikokeet jaettiin suljetussa ja avoimessa tilassa leikattuihin lujuusominaisuuksien määrittämistä varten. Suljetut kokeet olivat pääosin vakio muodonmuutoksella leikattuja ja avoimet pääosin portaittain leikattuja. Lujuusominaisuudet määritettiin p'-q-koordinaatton piirretyistä jännityspoluista, apuna käyttäen esimerkiksi  $\varepsilon_1$ -q-kuvaajaa murtokohdan löytämiseen. Jännityspolkukuvaajiin (kuvat 6.5 ja 6.6) sovitettiin murtosuora ja kriittisen tilan suora. Kriittisen tilan suora kulkee aina origon kautta, mutta murtosuora voi leikata q-akselin myös origon yläpuolella. Suorat sovitettiin niin, että ne osuvat mahdollisimman lähelle näytteiden murtokohtia. Kriittisen tilan suorasta käytetään lyhennettä CSL ("Critical state line") ja sitä kuvataan tuplaviivalla, murtosuorasta käytetään lyhennettä FL ("Failure line"). Lujuusominaisuudet kitkakulma ja koheesio laskettiin näitten suorien kulmakerroimien ja murtosuoran q-akselin leikkauskohdan avulla (kaavat 6.1–6.3). Koska laskennassa käytetään yleensä tehokkaita jännityksiä, voidaan tehokas kitkakulma ja tehokas koheesio määrittää samoista kaavoista.

$$\sin \varphi' = \frac{3k_1}{6+k_1} \quad (6.1)$$

$$c' = q_0 \frac{3-\sin \varphi'}{6 \cos \varphi'} \quad (6.2)$$

$$\sin \varphi'_c = \frac{3M}{6+M} \quad (6.3)$$

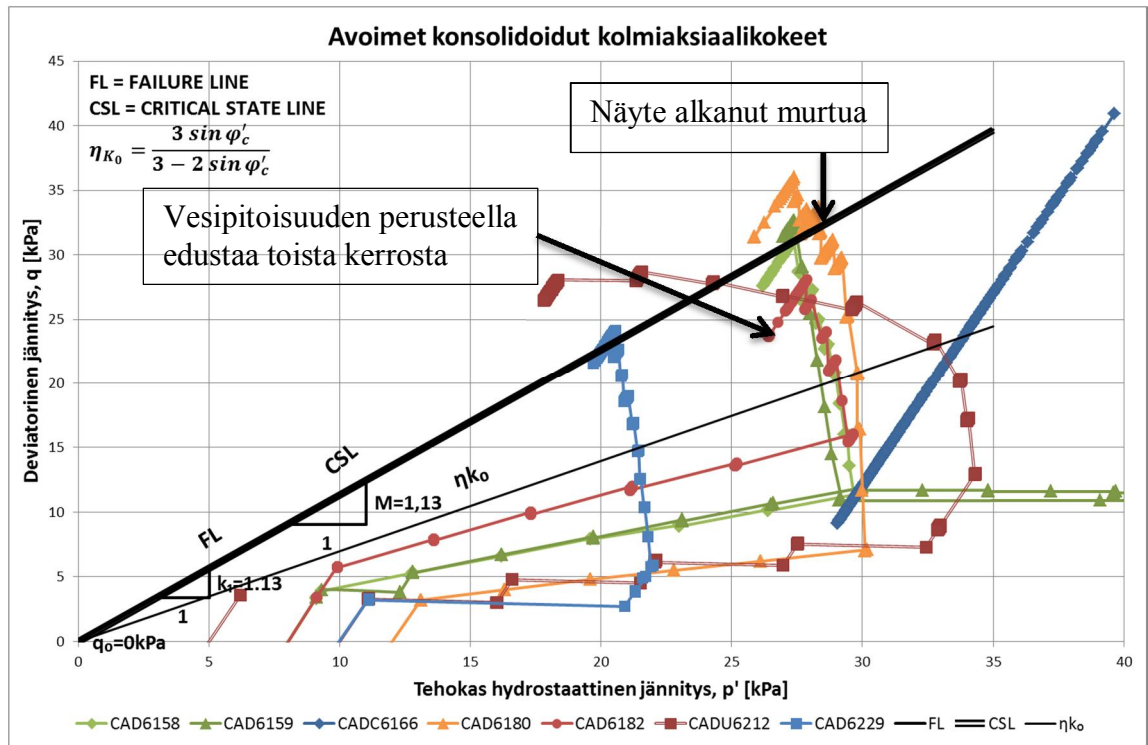
jossa $\varphi'$	on murtosuorasta määritetty tehokas kitkakulma
$k_1$	murtosuoran kulmakerroin
$c'$	murtosuorasta määritetty tehokas koheesio
$q_0$	murtosuoran ja q-akselin leikkauspiste
$\varphi'_c$	kriittisen tilan kitkakulma

Lisäksi kuvaajiin on piirretty  $\eta_{K_0}$ -suora, joka kuvaa maassa vallitsevaa jännityssuhdetta. Tällä jännityssuhteella ei näytteessä pitäisi tapahtua vaakasuuntaista muodonmuutosta.  $\eta_{K_0}$  saadaan laskemalla lepopaine kerroin  $K_0$  Jakyn kaavan avulla (kaava 6.4) ja muuntamalla lepopaine kerroin p'-q-koordinaatistoon kaavan 6.5 mukaisesti.

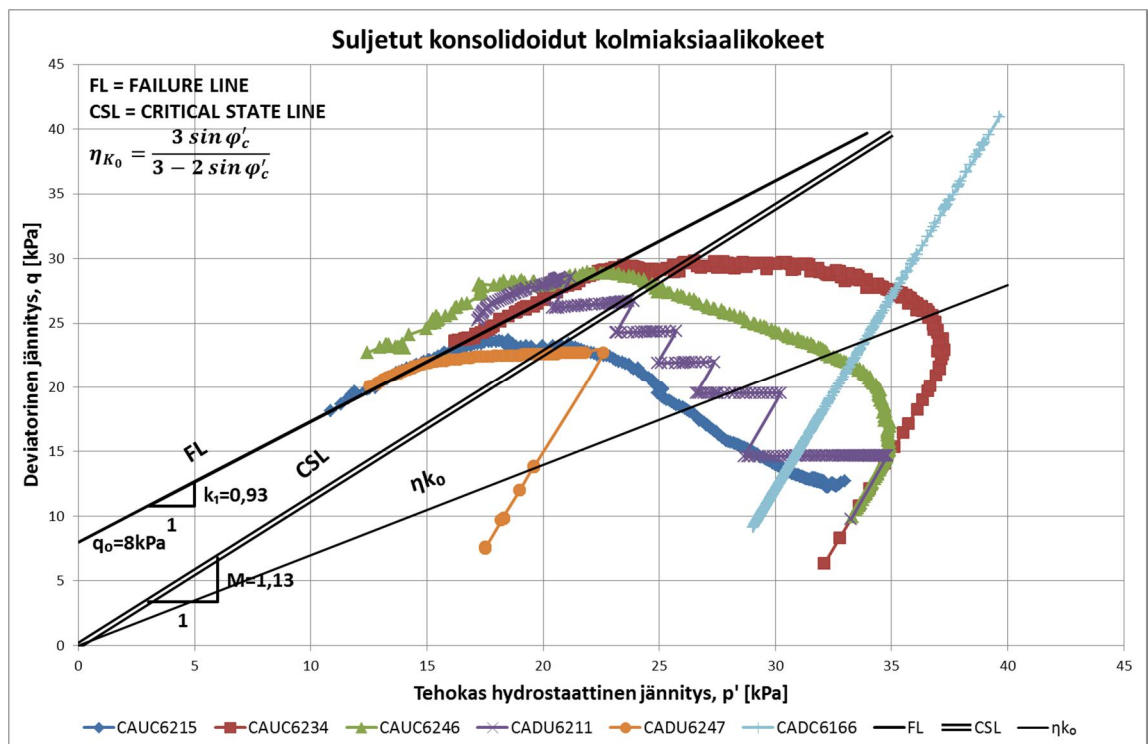
$$K_0 = 1 - \sin \varphi'_c = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} \quad (6.4)$$

Koska  $q = \sigma_1 - \sigma_3$ ,  $p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$  ja  $K_0 \cdot \sigma_1 = \sigma_3$  saadaan

$$\eta_{K_0} = \frac{q}{p} = \frac{3(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sigma_1 + 2\sigma_3} = \frac{3(1 - K_0)}{1 + 2K_0} = \frac{3 \sin \varphi'_c}{3 - 2 \sin \varphi'_c} \quad (6.5)$$



Kuva 6.5. Lujusparametrien määrittäminen avoimista kolmiakσιαalikokeista p'-q-koordinaatistosta



Kuva 6.6. Lujusparametrien määrittäminen suljetuista kolmiakσιαalikokeista p'-q-koordinaatistosta

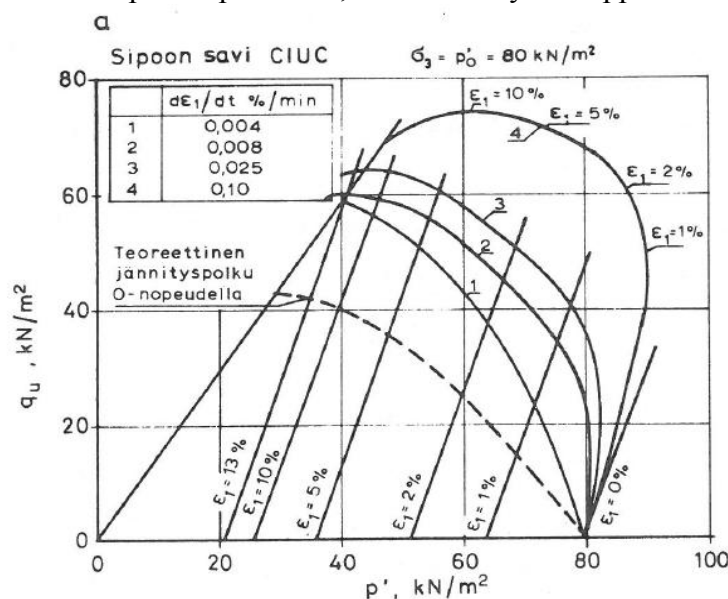
Avoimet kokeet voidaan tulkita kuvan 6.5 mukaan siten, että kriittisen tilan suora ja murtosuora ovat päällekkäin, kummatkin kulkevat origon kautta ja kulmakertoimet ovat samat. Avoimessa tilassa huokosvedenpainetta ei synny, jolloin koheesio on todella pieni tai nolla, jolloin myös murtosuora kulkee origon kautta. Kokeitten voidaan sanoa onnistuneen hyvin, sillä koheesiota ei ole havaittavissa ja murtokohdat osuvat melko hyvin suoralle ja osa poikkeamasta on selitettävissä. Kokeista saadaan kaavojen 6.1–6.3

avulla tehokkaan kitkakulman arvoksi  $\varphi' = \varphi'_c = 28,5^\circ$  ja tehokkaan koheesioarvoksi  $c' = 0$  kPa.

Suljetuissa kokeissa havaitaan selvästi, että käyrien loppupäätt seuraavat samaa suoraa, joka tulkittiin murtosuoraksi (kuva 6.6), kriittisen tilan suora kulkee määritelmän mukaan origon kautta. Kriittisen tilan suoran kulmakertoimen  $M$  arvoksi valittiin avointen kokeitten tulkinnasta saatu arvo, joka kuvaa hyvin tilannetta. Pelkkien suljettujen kokeitten perusteella kriittisen tilan suoran kulmakertoimeksi voitaisiin valita myös hie- man isompi tai pienempi arvo tulkinnasta riippuen. Murtosuoran kulmakertoimen ja  $q$ - akselin leikkauspisteen avulla saadaan tehokkaaksi kitkakulmaksi  $\varphi' = 23,8^\circ$  ja tehok- kaaksi koheesioksi  $c' = 3,78$  kPa. Kriittisen tilan suoran kulmakertoimen avulla tehok- kaan kitkakulman arvoksi saadaan sama kuin avoimessa tilassa eli  $\varphi' = 28,5^\circ$ . Avoi- messa tilassa murtosuoralle saatua suurempaa kitkakulmaa selittää suljetussa tilassa havaittava koheesio. Koska suljetussa tilassa huokosvedenpaine ei pääse purkautumaan, ei mitata vain rakeiden välistä kitkaa, vaan myös koheesiota.

### 6.3 Pystysuuntainen muodonmuutosnopeus kolmiaksaaliko- keissa

Pakotetulla muodonmuutoksella tehdyissä suljetuissa kolmiaksaalikokeissa jännityspo- lun muoto vaihtelee nopeuden mukaan. Kuvasta 6.6 voidaan huomata pakotetun muo- donmuutosnopeuden vaikutus näytteen jännityspolkuun. Muodonmuutosnopeus ei vai- kuta saatujen lujuusparametrien arvoon, koska jännityspolkujen loppupäätt yhtyvät sa- malle suoralle (kuva 6.6). Se saattaa vaikuttaa saatua huippujännitykseen. Avoimessa kokeessa nopeuden merkitys on vielä suurempi, sillä nopeuden tulee olla niin hidas, ettei näytteeseen synny huokospainetta. Muodonmuutosnopeuden vaikutusta jännitys- polkuun on tutkittu aikaisemmin myös esimerkiksi Sipoon savelle (kuva 6.7). Sipoon savelle saadut jännityspolun muodot ovat hyvin samanlaisia kuin kuvassa 6.6 esitetyt, HUT-Clay:lle saadut. Kuvassa 6.7 esitetty teoreettinen nollanopeuden jännitysviiva on laskettu lähteestä löytyvällä kaavalla. Nollanopeutta vastaava jännityspolku on hyvin samansuuntainen kuin 0,001 mm/min nopeudella leikatun CAUC6215 kokeen jännitys- polku. Sipoon saven tutkimuksessa todettiin, että sopiva muodonmuutosnopeus on sel- vitettävä tapaus tapaukselta, sillä se on hyvin riippuvainen maalajista (Korhonen, 1979).



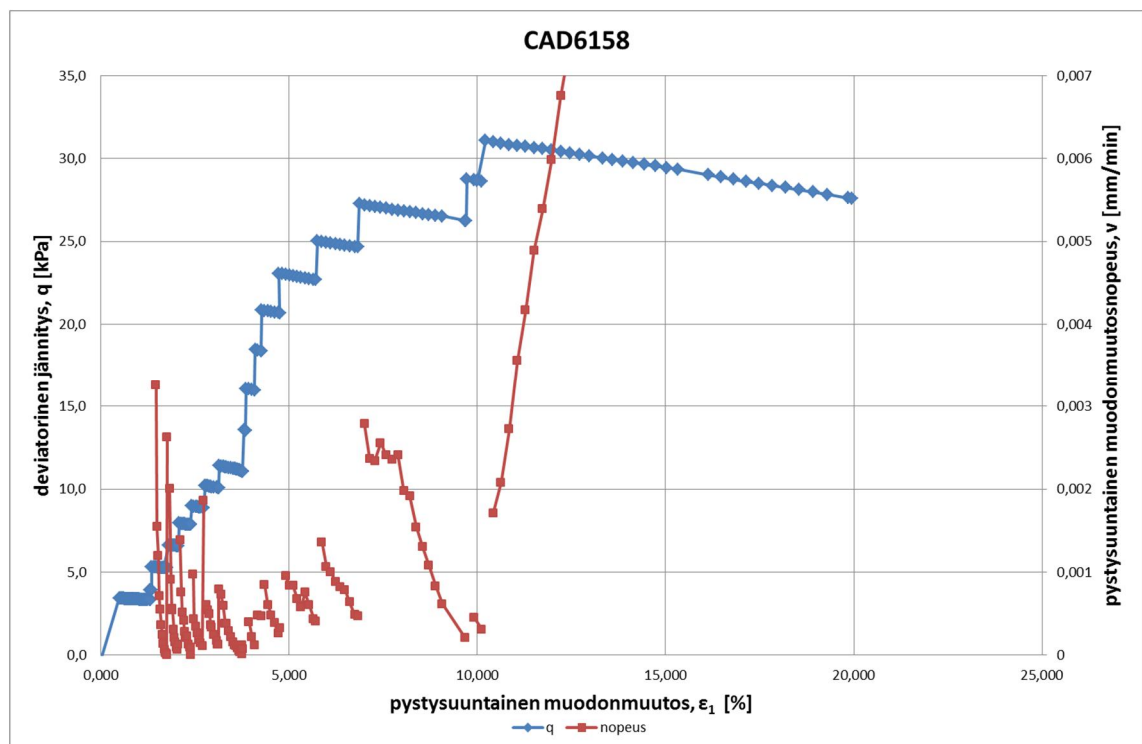
Kuva 6.7. Muodonmuutosnopeuden vaikutus Sipoon saven jännityspolkuun (Korhonen, 1979)

Portaittaisissa kolmiaksaalikokeissa pystysuuntaista kuormaa lisätään portaittain. Por- taittien välinen aika riippui kokeen vaiheesta, sekä lisätyn kuorman suuruudesta. Leik-

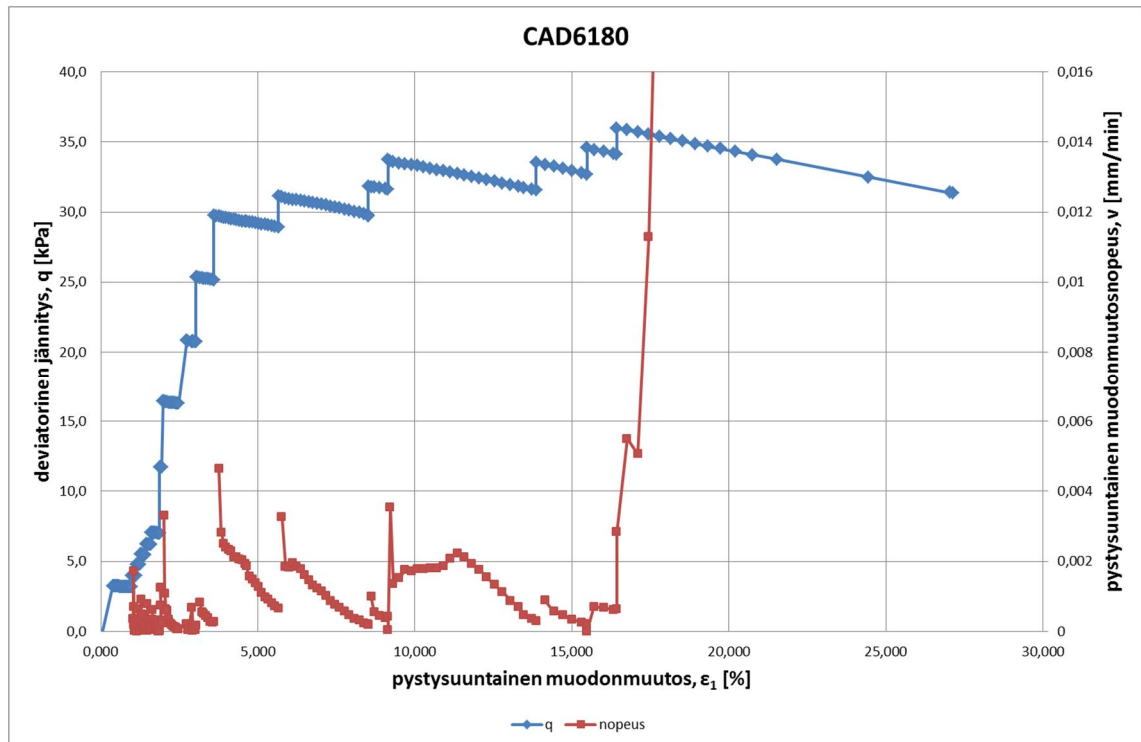
kausvaiheessa aika oli yleensä noin vuorokausi. Portaittaisessa kolmiakσιαalikokeessa pystysuuntainen muodonmuutosnopeus riippuu kuormituksesta ja näytteen jännitystilasta. Kuvissa 6.8–6.11 on esitetty pystysuuntainen muodonmuutosnopeus portaittaisessa kolmiakσιαalikokeessa, jossa muodonmuutos sai tapahtua näytteen ehdoilla. Ennen murtokuormaa olevissa portaissa kuorman lisäyksen jälkeen nopeus nousi, mutta lähti heti laskemaan ja jo vuorokauden aikana saavutti hyvin pieniä arvoja. Esimerkiksi pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratoriossa käytetään pakotetun muodonmuutoksen arvoina suljetussa tilassa 0,01 mm/min ja avoimessa tilassa 0,001 mm/min. Portaittaisen kokeen nopeus päättyy vuorokaudessa noin kymmenesosaan tai alle avoimessa tilassa käytetystä nopeudesta. Avoimen ja suljetun tilan välillä ei portaittaisissa kokeissa ole eroa.

Pystysuuntaisen muodonmuutoksen käyttäytyminen näytteen murtumisportaassa on mielenkiintoista. Kuvista 6.8–6.11 voidaan nähdä, että portaassa jossa näyte murtuu, nopeus ei lähde ollenkaan laskemaan, toisinkuin muissa portaissa. Tämä nopeuden käyttäytyminen pätee myös muihin portaittaisiin kokeisiin, jotka on tehty tämän työn aikana. Käyttäytymisen perusteella voidaan sanoa, että näyte alkaa heti kuorman lisäyksen jälkeen murtua, mikäli jännitys ylittää näytteen kestävyuden. Murtumistapahtuma ei kuitenkaan ole äkillinen kuten voisi olettaa vaan voi kestää pitkäänkin. Näytteessä alkaa tapahtua pieniä paikallisia plastisia muodonmuutoksia, joiden summana näyte lopulta murtuu.

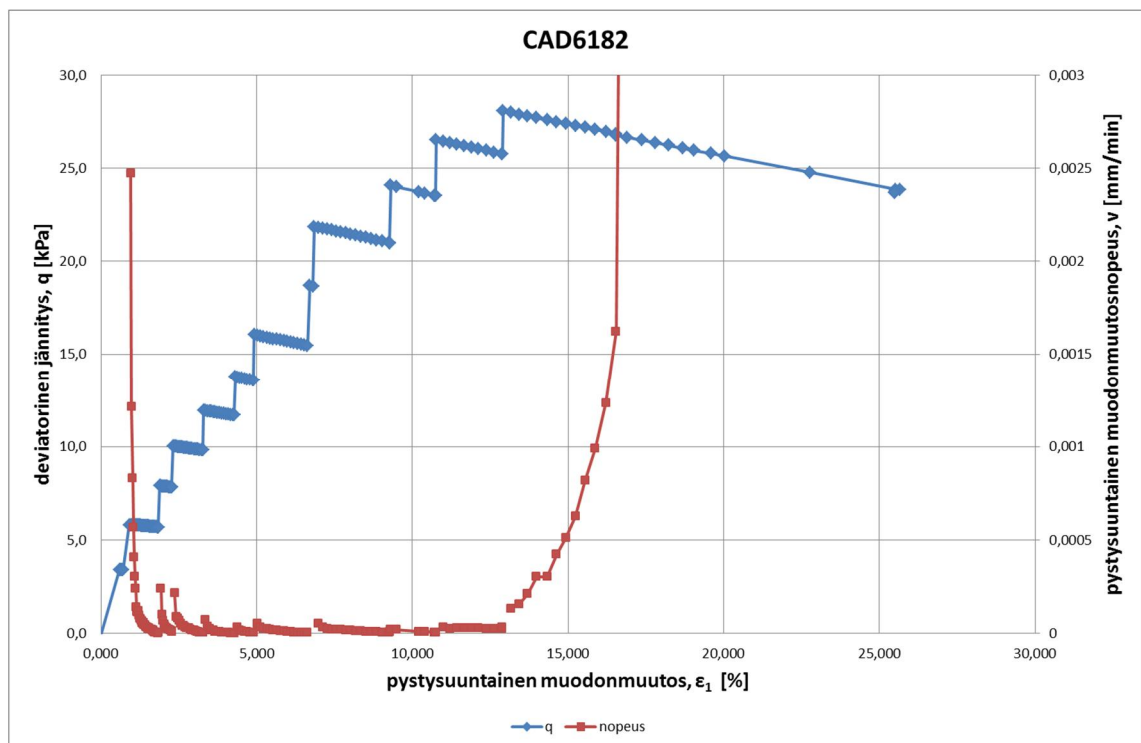
Kiinnostavaa olisi tutkia onko näytteen murtumistavalla (leikkauspinta, halkaisijan leviäminen) vaikutusta nopeuteen. Lisäksi nopeuden hidastuminen ennen murtoa olevissa portaissa tuntuu noudattavan tiettyä kaavaa, sillä kuvista 6.8–6.11 voidaan nähdä, että nopeuskäyrät ovat melko samanmuotoisia. Näitä asioita ei kuitenkaan tässä työssä ajan puitteissa pystytty tutkimaan.



Kuva 6.8. Pystysuuntainen muodonmuutosnopeus avoimessa portaittaisessa kolmiakσιαalikokeessa

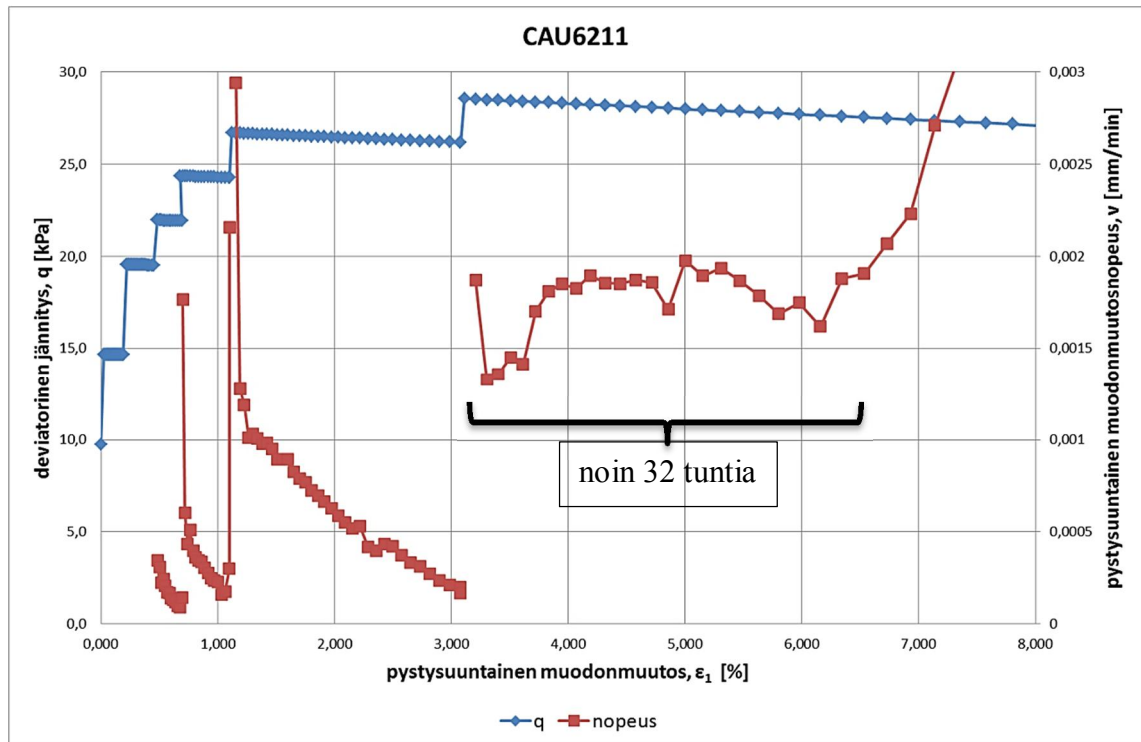


Kuva 6.9. Pystysuuntainen muodonmuutosnopeus avoimessa portaittaisessa kolmiaksaalikokeessa



Kuva 6.10. Pystysuuntainen muodonmuutosnopeus avoimessa portaittaisessa kolmiaksaalikokeessa





Kuva 6.11. Pystysuuntainen muodonmuutosnopeus suljetussa portaittaisessa kolmiaksiaalikohteessa

#### 6.4 Myötöpinnan parametrien määrittäminen avoimesta- ja suljetusta kolmiaksiaalikohteesta

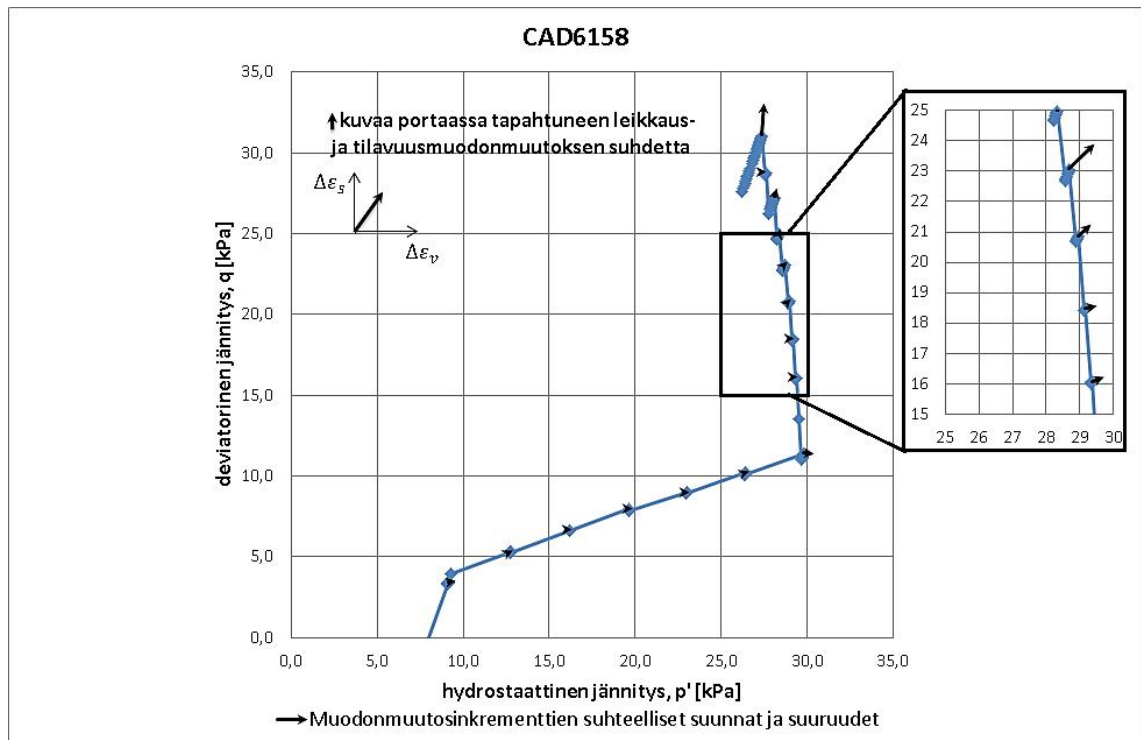
Yksi työn tärkeimpiä tavoitteita oli etsiä nopeampia ja helpompia tapoja määrittää myötöpinnan parametrit. Työssä on keskitytty S-CLAY1S mallin mukaisen myötöpinnan parametrien määrittämiseen. Työn aikana tehtiin useita  $p$ =vakio kokeita, sillä nämä osoittautuivat lupaavimmiksi koetyypeiksi. Kokeen jokaisesta portaasta pystytään laskemaan leikkaus- ja tilavuudenmuodonmuutoksen suhde. Tämä suhde voidaan esittää kuvan 6.12 mukaisesti. Kuvassa on esitetty  $p'$ - $q$ -koordinaatistossa kokeen jännityspolku, sekä jokaisessa kuormituspisteessä omassa  $\Delta\varepsilon_v$ - $\Delta\varepsilon_s$ -koordinaatistossaan kuormitusportaassa tapahtuneet muodonmuutokset. Lisäksi muodonmuutokset on suhteutettu kaikkien portaitten kesken, niin että viivan pituus kuvaa tapahtunutta muodonmuutosta suurimpaan muodonmuutokseen nähden. Kuvasta 6.12 voidaan huomata, että kuormitus-suhteen  $q/p'$  kasvaessa, muodonmuutosinkrementin suunta kääntyy vaakasuorasta pystysuoraan. S-CLAY1S mallissa on esitetty kaavan 2.50 mukainen yhteys muodonmuutosinkrementin ja  $q/p'$ -suhteen kesken.

$$\frac{d\varepsilon_s^p}{d\varepsilon_v^p} = \frac{2(\eta - \alpha)}{M^2 - \eta^2} \quad (2.50 \text{ bis})$$

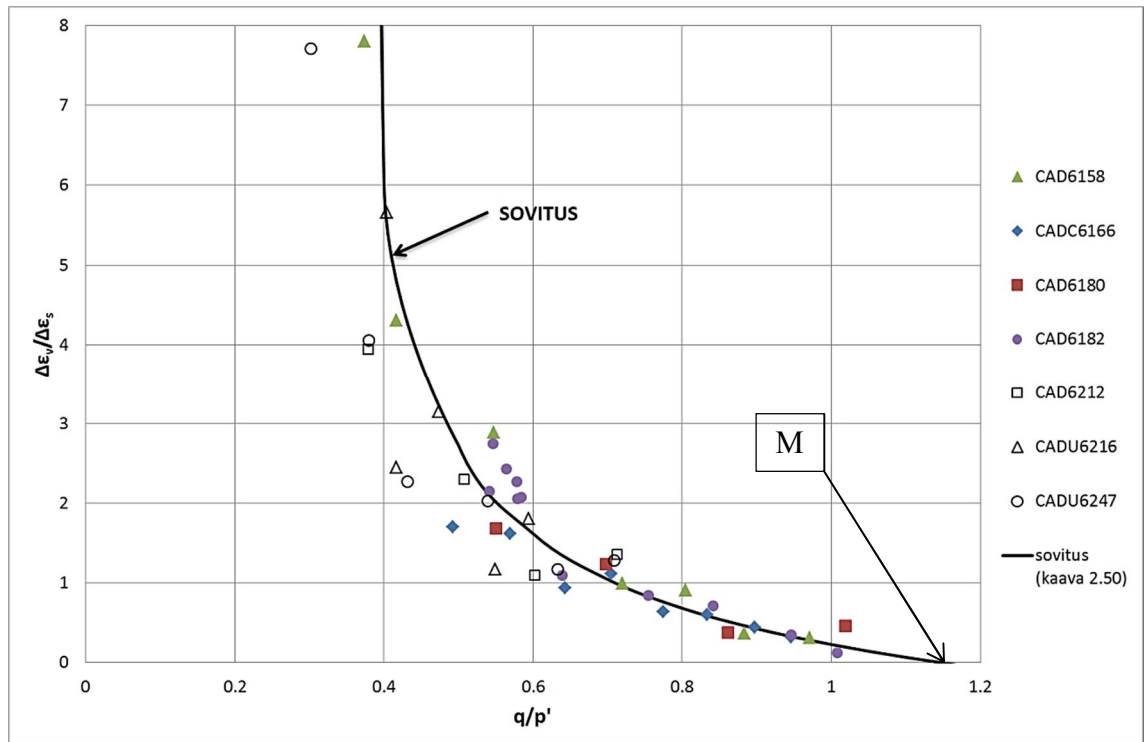
Kaavassa 2.50 tuntemattomia, määritettäviä parametreja ovat  $M$  ja  $\alpha$ , jotka ovat eräänlaisia  $q/p'$ -suhteen raja-arvoja. Näitten määrittämiseksi kokeista saadut inkrementit on piirretty kuvien 6.13–6.15 mukaisiin kuviin. Kaavan 2.50 mukaan pisteiden tulisi linearisoitua kuvan 6.15 mukaisessa koordinaatistossa.

$M$  ja  $\alpha$ -parametrien määrittäminen aloitetaan kuvasta 6.13. Tästä kuvasta arvioidaan  $M$ -parametrin suuruus siitä, missä havaintopisteet osuvat vaakasuoraan akseliin. Tämän jälkeen voidaan joko arvioida suoraan  $\alpha$ -parametrien arvoa kuvasta 6.14 tai käyttää hyväksi kaavan 2.50 linearisoituvaa muotoa  $M$ -parametrin avulla kuvan 6.15 mukaisesti. Kuvas-

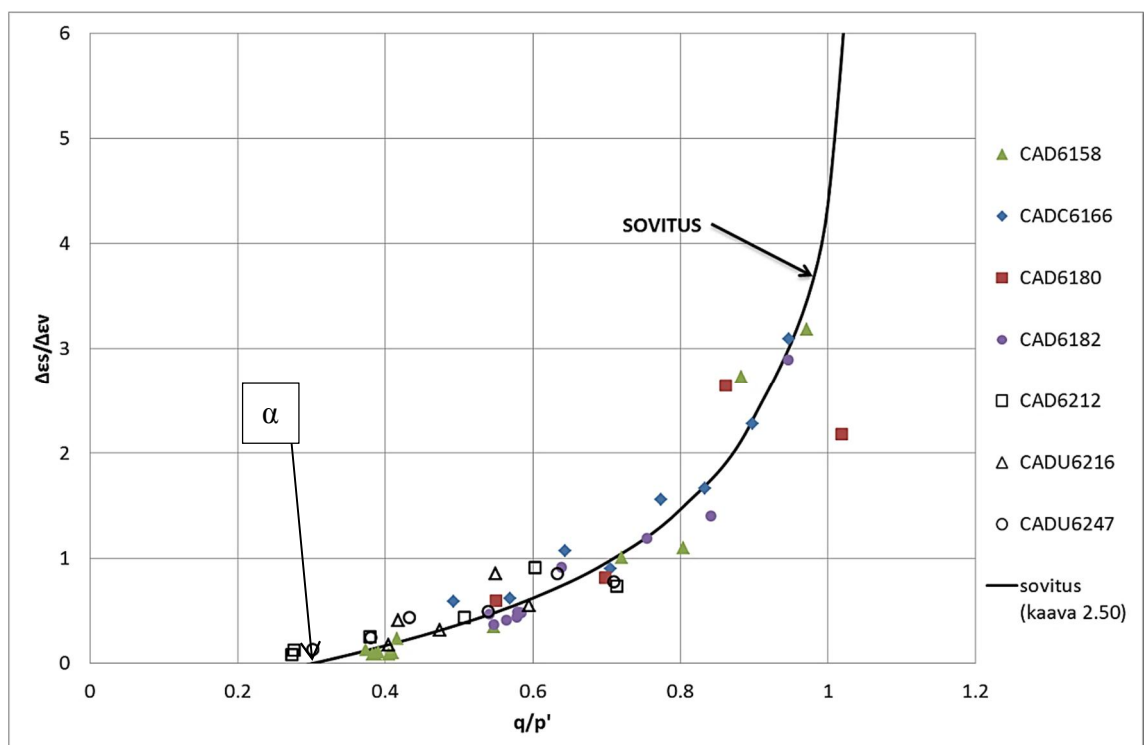
ta 6.15  $\alpha$ -parametri saadaan laskettua sovitussuoran funktiosta. Kuvan 6.15 käyttö yhdessä kuvien 6.13 ja 6.14 kanssa parametrien määrittämisessä on suotavaa, sillä sen avulla voidaan tarkistaa  $M$  ja  $\alpha$ -parametrien yhteensopivuus. Työn aikana tehdyistä kokeista saadut havainnot vastaavat melko hyvin teoriaa. On kuitenkin aina muistettava luonnon-tilaisten näytteiden epähomogeenisuus. Lisäksi esimerkiksi kuormitusportaiden eripituiset kuormitusajat saattavat vaikuttaa tuloksiin. Parametrien arvoiksi saatiin  $M=1,148$  ja  $\alpha=0,305$ , näiden avulla on piirretty S-CLAY1S:n mukainen myötöpinta (kaava 2.43) kuvaan 6.16. Myötöpinnan parametrin  $p_m$  arvona on käytetty konsolidointipisteen  $p'$  arvoa, joka vastaa äärimmäistä  $p'$  arvoa CAD6158, CAD6180 ja CAD6182 kokeille.



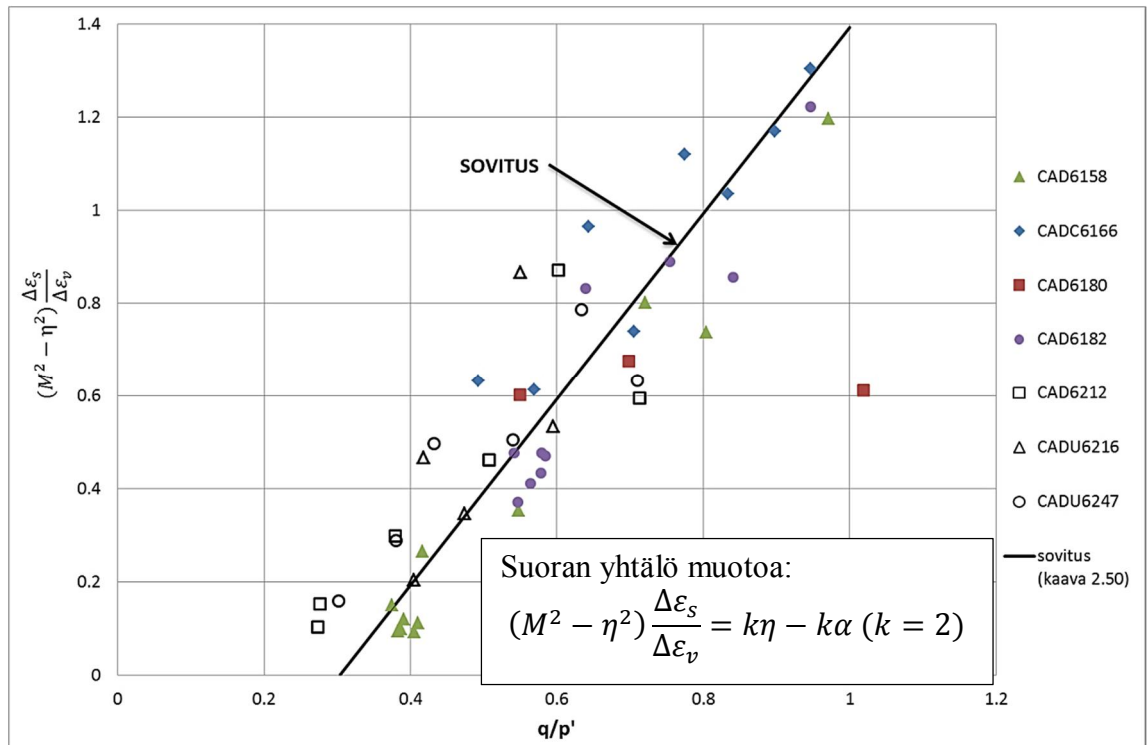
Kuva 6.12. Muodonmuutosinkrementtien suhteelliset suunnat ja suuruudet



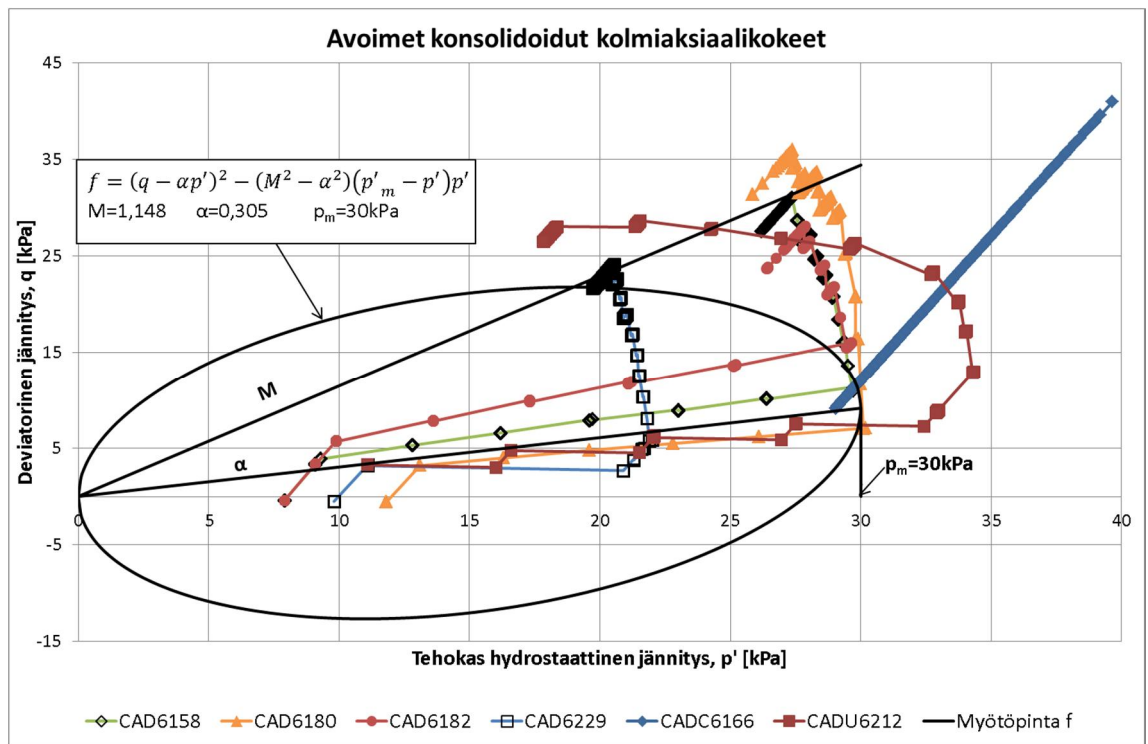
Kuva 6.13. Muodonmuutosinkrementit  $q/p'$ -jännityssuhteen funktiona, M-parametrin määrittäminen



Kuva 6.14. Muodonmuutosinkrementit  $q/p'$ -jännityssuhteen funktiona, α-parametrin määrittäminen



Kuva 6.15. Kaava 2.50 linearisoituvassa muodossa,  $\alpha$ -parametrin määrittäminen ja sen yhteensopivuuden tarkistus M-parametrin kanssa



Kuva 6.16. S-CLAY1S:n mukainen myötöpinta

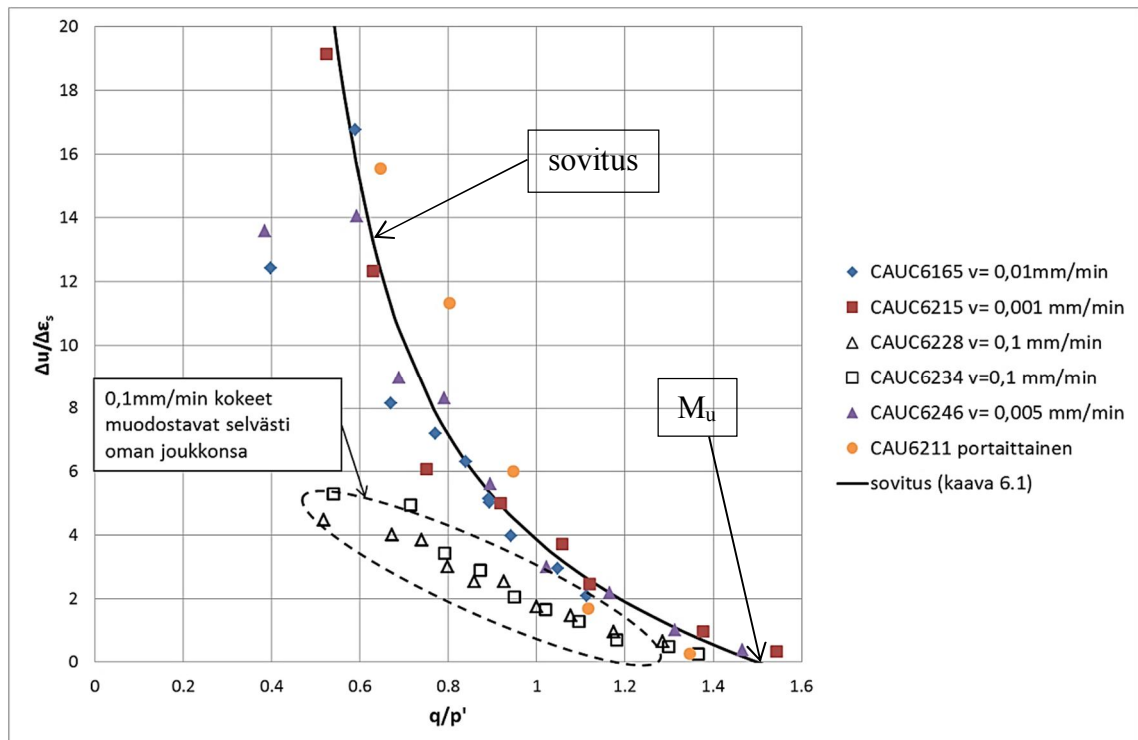
Suljetuissa kokeissa ei tapahdu lainkaan tilavuudenmuutosta, tästä johtuen näytteen huokosvedenpaine nousee. Työn aikana havaittiin, että huokosvedenpaineen muutoksen ja leikkausmuodonmuutoksen suhde noudatti samanmuotoista käyrää  $q/p'$  suhteen funktiona kuin avoimessa kokeessa tilavuudenmuodonmuutoksen suhde leikkausmuodonmuutokseen. Kuviin 6.17–6.19 on esitetty avoimen tilan kuvia 6.13–6.15 vastaavat suljettujen kokeiden kuvaajat. Käyrän muoto on hyvin samanlainen, mutta lukuarvot

poikkeavat toisistaan. Tämän vuoksi avoimessa tilassa käytettyyn kaavaan 2.50 täytyy tehdä pieni muutos. Suljettua tilaa varten kaavassa oleva vakio 2 korvataan vakioilla 0.5 jolloin saadaan

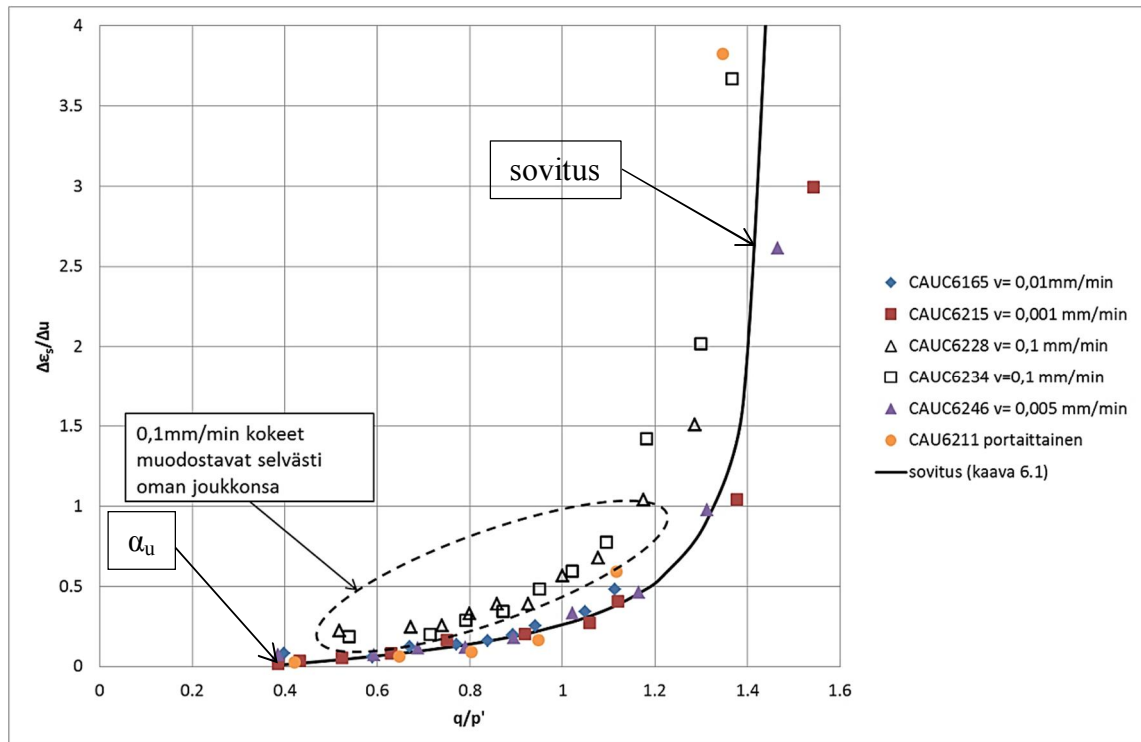
$$\frac{d\varepsilon_s^p}{d\varepsilon_v^p} = \frac{0,5(\eta - \alpha_u)}{M_u^2 - \eta^2} \quad (6.1)$$

jossa  $M_u$  on suljetun tilan myötöpinnan muotoparametri  
 $\alpha_u$  suljetun tilan myötöpinnan muotoparametri

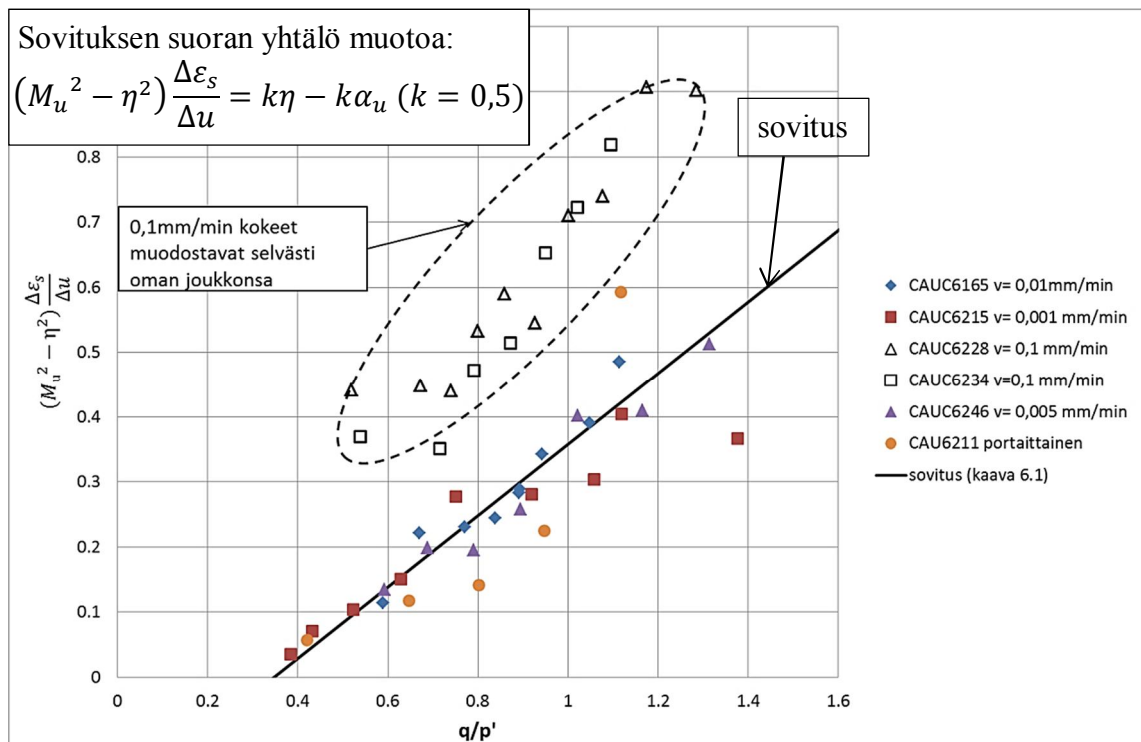
Koska kriittinen tila ja sen parametrit  $M$  ja  $\alpha$  ovat määritelty avoimessa tilassa, ei suljetussa tilassa määritetyille parametreille voi käyttää samoja merkintöjä. Tämä on tärkeää myös laskennan kannalta, sillä suljetussa tilassa määritetyt parametrit eivät ainakaan tässä tapauksessa saa samoja lukuarvoja avoimessa tilassa määritettyjen kanssa. Avoimen tilan  $M$  ja  $\alpha$ -parametreja vastaavia suljetun tilan parametreja ovat  $M_u$  ja  $\alpha_u$ , ja ne ovat myötöpinnan muotoparametreja, eivät siis laskentaparametreja. Määrittämällä nyt parametrit  $M_u$  ja  $\alpha_u$  samalla tavoin kuin avoimessa tilassa käyttäen kaavan 6.1 mukaista yhteyttä saadaan sovitukset jotka näkyvät kuvissa 6.17–6.19. Parametrien  $M_u$  ja  $\alpha_u$  arvoiksi saadaan  $M_u=1,5$  ja  $\alpha_u=0,35$ . Näistä  $\alpha_u$ :n arvo vastaa melko hyvin avoimessa tilassa saatua, mutta  $M_u$ :n arvo on huomattavasti suurempi. Sovituksessa ei ole huomioitu nopealla 0,1mm/min nopeudella tehtyjä suljettuja kokeita, sillä ne muodostavat selvästi oman ryhmänsä. Suljetut kolmiakσιαalikokeet on konsolidoitu suunnilleen samalla jännityssuhteella. Tämä voi vaikuttaa  $\alpha_u$  parametrin lähtöarvoon, sillä konsolidointi tehdään avoimessa tilassa, joten huokosvedenpaine alkaa nousta vasta tästä jännityssuhteesta alkaen. Kuvassa 6.20 on esitetty  $p'$ - $q$ -koordinaatistossa osa suljetussa tilassa tehdyistä kolmiakσιαalikokeista sekä myötöpinnat avoimessa ja suljetussa tilassa määritettyjen parametrien mukaisesti.



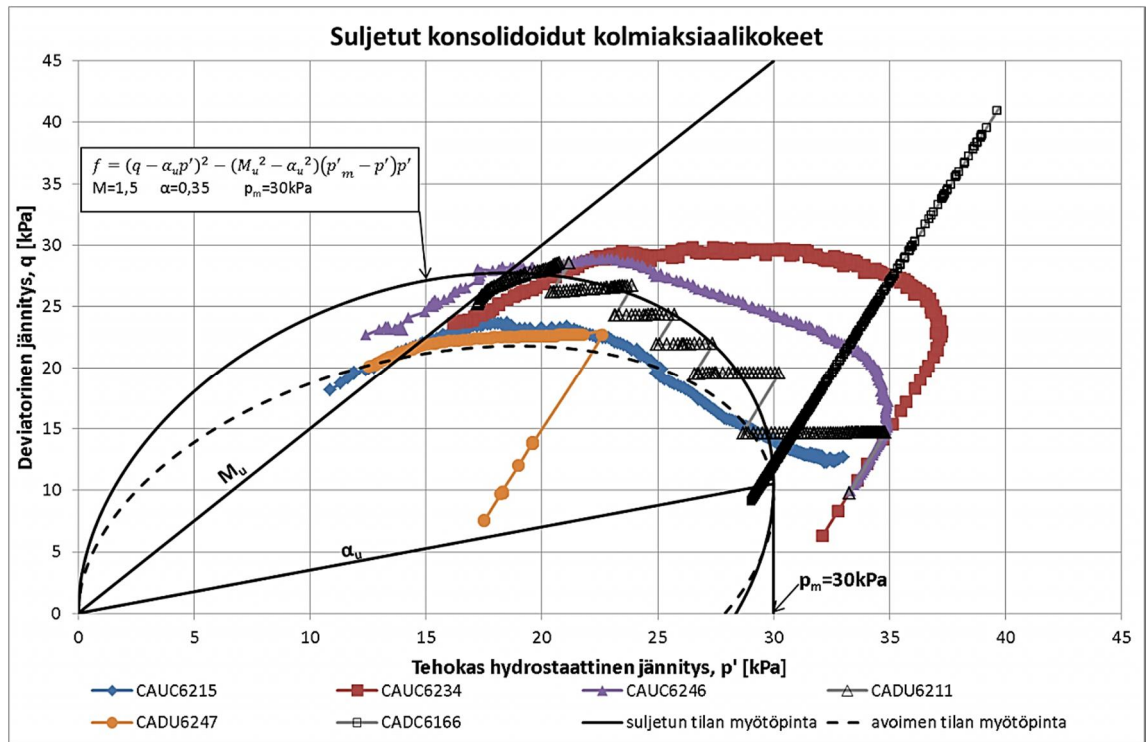
Kuva 6.17. Suljetun tilan myötöpinnan muotoparametrin  $M_u$  määrittäminen



Kuva 6.18. Suljetun tilan myötöpinnan muotoparametrin  $\alpha_u$  määrittäminen



Kuva 6.19. Kaava 2.50 linearisoituvassa muodossa,  $\alpha_u$ -parametrin määrittäminen ja sen yhteensopivuuden tarkistus  $M_u$ -parametrin kanssa



**Kuva 6.20.** Suljettujen anisotrooppisesti konsolidoitujen kolmiaksaalikokeiden myötöpinnat sekä avoimen ja suljetun tilan myötöpinnat.

## 7 Johtopäätökset ja ehdotukset jatkotutkimuksille

Työn tarkoituksena oli kehittää olemassa oleville kolmiaksiaali- ja ödometrikolaitteille uusia koemenetelmiä ja tulkintapoja, joitten avulla pystyttäisiin nopeammin ja helpommin määrittämään maan mekaanisessa mallintamisessa käytettäviä parametreja. Työn aikana otettiin myös käyttöön kokonaan uusi ödometrikoeselli, jossa pystyttiin mittaamaan huokosvedenpainetta näytteen pohjasta kokeen aikana. Kaikki kokeet tehtiin häiriintymättömille näytteille ja kokeista saatiin paljon lupaavia ja mielenkiintoisia tuloksia ja yleisesti voidaan sanoa, että lähes yhtään koetta ei epäonnistunut.

Tavallisissa portaittaisissa ödometrikokeissa huomiota voidaan antaa kuorman lisäyksen suhteen vaikutukselle. Työn aikana kokeiltiin portaittaisia kokeita  $LIR < 1$  suhteilla, joista huomattiin, ettei kuormitussuhde vaikuta painuman loppuarvoon, mutta johtaa pienempään vedenläpäisevyyden arvoon.

Huokospaineödometrin käyttöönotto toi merkittävän lisän saven konsolidaatitutkimukseen. Saaduista tuloksista voidaan tehdä monia erilaisia tulkintoja saven konsolidaatiokäyttäytymisestä ja sen suhtautumisesta klassisiin teorioihin. Painumalajien erotteluun käytetty graafinen menetelmä osoittautui lupaavaksi. Etenkin näytteen pohjalta mitatun huokosvedenpaineen maksimiarvon suhde lisättyyn jännitykseen ja aika, joka menee jotta huokosvedenpaine nousee maksimiarvoonsa, ovat lisätutkimisen arvoisia seikkoja. Kokeita tulisi tehdä lisää myös erilaisilla näytteillä vaihdellen esimerkiksi näytteenotto- paikkaa, kokoa ja kuormitussuhdetta. Myös rakennettujen näytteiden käyttö voisi kertoa jotain uutta.

Kolmiaksiaalikokeissa panostettiin myös mittausdatan käsittelyyn. Pitkäaikaisissa kolmiaksiaalikokeissa hankaluutena olivat usein kymmenet tuhannet mittausdatapisteet. Työn aikana tehdyllä Excel-työkirjalla datapisteitä pystytään vähentämään huomattavasti menettämättä tärkeitä tietoja. Pienempi pistemäärä helpottaa ja nopeuttaa selvästi datan käsittelyä.

Kokeilluista kolmiaksiaalikoemenetelmistä selvästi kiinnostavimpia olivat kokeet, joissa tehokas hydrostaattinen jännitys pidettiin vakiona ja deviatorista jännitystä nostettiin portaittain. Työssä on esitetty tapa, jolla tällaisesta kokeesta pystytään määrittämään muodonmuutosinkrementtien avulla myötöpinnan parametrien  $M_n$  ja  $\alpha_n$  arvot, ilma usean kokeen sarjoja. Huomattiin myös, että avoimen kokeen tilavuudenmuutoksen ja suljetun kokeen huokosvedenpaineen välillä on yhteys, jonka avulla suljetusta leikkauskokeesta pystyttäisiin mahdollisesti määrittämään nämä samat parametrit.

Jos suljetussa ja avoimessa tilassa määritettyjen parametrien välille, etenkin  $M_u$ :n ja  $M_n$ , saataisiin muodostettua luotettava yhteys ja myötöpinnan parametrit voitaisiin määrittää suljetulla kolmiaksiaalikokeella, nopeuttaisi ja helpottaisi se myötöpinnan parametrien määrittämistä huomattavasti. Tämä kuitenkin vaatisi vielä huomattavan paljon lisäkokeita erilaisilla savimateriaaleilla. Lisähuomiota ja jatkotutkimusta pitää myös suorittaa suljettujen kokeitten konsolidoinnin jännityssuhteen vaikutukselle etenkin parametriin  $\alpha_u$ . Työn aikana avoimessa tilassa tehdyt  $p$ -vakio kokeet ovat osoittautuneet myös onnistuneeksi kokeiluksi. Portaittaisesta kokeesta on helppo laskea muodonmuutosinkrementtien suuntia, nopeuden kehittymistä ja murtokohta lujuusparametrejä varten on helppo määrittää.

Työtä tulisi jatkaa myös kokeilemalla mallintamista määritetyillä parametreilla ja tulkitsemalla tällä tavalla määritettyjen parametrien ja määritystapojen käyttökelpoisuutta.



## 8 Lähdeluettelo

Aalto, A, Ravaska, O & Lojander, M. 2003. Murron saven painumaparametrit, VIII Suomen mekaniikkapäivät Espoossa 12.-13.6.2003. Espoo, Teknillinen korkeakoulu.

Bengtsson, P.E., & Larsson R. 1994. Användarhandbok Program Embankco, version 1.02. Statens Geotekniska Institut och Vägverket. Linköping.

Berre, T. & Iversen, K. 1972. Oedometer tests with different specimen heights on a clay exhibiting large secondary compression. Norges Geotekniske Institutt.

Brinch-Hansen, J. 1961. A model law for simultaneous primary and secondary consolidation. Proc. 5. ICSMFE, Vol. 1. Paris

Buisman, A. 1936. Results of Long Duration Settlement Tests. Proc. Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engr. Vol. I. pp. 103-106.

Casagrande, A. 1936. The determination of preconsolidation load and its practical significance. Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Vol. III. Cambridge, Mass.

CEN ISO/TS 17892-1. 2007. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriotestit. Osa 1: Vesipitoisuuden määrittäminen. Suomen Standardisoimisliitto.

CEN ISO/TS 17892-2. 2007. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriotestit. Osa 2: Hienorakeisen maan irtotiheyden määrittäminen

CEN ISO/TS 17892-3. 2007. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriotestit. Osa 3: Kiintotiheyden määrittäminen. Pyknometri menetelmä ja sen soveltaminen Suomessa. Suomen Standardisoimisliitto.

CEN ISO/TS 17892-4. 2007. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriotestit. Osa 4: Rakeisuuden määrittäminen ja sen soveltaminen Suomessa. Suomen Standardisoimisliitto.

CEN ISO/TS 17892-5. 2007. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriotestit. Osa 5: Ödometrikoe (kuorman lisäys portaittain) ja sen soveltaminen Suomessa. Suomen Standardisoimisliitto.

CEN ISO/TS 17892-6. 2007. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriotestit. Osa 6: Kartiokoe ja sen soveltaminen Suomessa. Suomen Standardisoimisliitto.

CEN ISO/TS 17892-7. 2007. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriotestit. Osa 7: Hienorakeisen maan yksiakselialinen puristuskoe. Suomen Standardisoimisliitto.

CEN ISO/TS 17892-8. 2007. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriotestit. Osa 8: Unconsolidated undrained triaxial test. Suomen Standardisoimisliitto.

CEN ISO/TS 17892-9. 2007. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriotestit. Osa 9: Konsolidoidut kolmiakselialikokeet (vedellä kyllästetty näyte) ja sen soveltaminen Suomessa. Suomen Standardisoimisliitto.

CEN ISO/TS 17892-10. 2007. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratorioko-  
keet. Osa 10: Suorat leikkauskokeet. Suomen Standardisoimisliitto.

CEN ISO/TS 17892-11. 2007. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratorioko-  
keet. Osa 11: Vedenläpäisevyyden määrittäminen. Vakiopaine- ja muuttuvapainekoe ja sen  
soveltaminen Suomessa. Suomen Standardisoimisliitto.

CEN ISO/TS 17892-12. 2007. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratorioko-  
keet. Osa 12: Konsistenssirajojen määrittäminen. Atterbergin rajat ja sen soveltaminen Suo-  
messä. Suomen Standardisoimisliitto.

Dafalias, Y. 1986. Bounding Surface Plasticity. I: Mathematical Foundation and Hypo-  
plasticity. J. Eng. Mech. 112(9). 966–987.

Dafalias, Y. 1987. An isotropic critical state clay plasticity model. Proc. of the 2nd In-  
ternational Conference of Constitutive Laws for Engineering Materials, Tucson, Arizo-  
na. Vol. 1, Elsevier.

Espoon kaupunki. 2014. Karttapalvelu. [viitattu 24.1.2014]. saatavissa:  
<http://kartat.espoo.fi/ims>

Gibson, R. E. 1963. An Analysis of System Flexibility and its Effect on Time-Lag in  
Pore-Water Pressure Measurements. Geotechnique, v. 13, no. 1, p. 1—11.

Healy, K. A. 1960. Pore pressure measurements during transient loadings. Cambridge,  
MA, Massachusetts Institute of Technology. Soil Engineering Division.

Helwany, S. 2007. Applied Soil Mechanics: with ABAQUS Applications. John Wiley  
& Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.

Janbu, N. 1967. Settlement calculations based on the tangent modulus concept. Uni-  
versity of Trondheim, Norwegian Institute of Technology, Geotechnical Institution.

Kohonen, E. 1987. Koetekniikan vaikutus saven ja hiekan mekaanisiin parametreihin.  
Diplomityö. Otaniemi.

Korhonen, K-H, Gardemeister, R. & Tammirinne, M. 1974. Geotekninen  
maalajiluokitus. Espoo, VTT.

Korhonen, K-H. 1979. Maan mekaaniset ominaisuudet. Deformoituminen avoimessa  
kolmiakselikokeessa. Espoo, VTT.

Korhonen, K-H, Lojander, M. 1987. Yielding of Perno clay. Proc. of the 2nd Interna-  
tional Conference of Constitutive Laws for Engineering Materials, Tucson, Arizona.  
Vol. 2. p. 1249-1255. Elsevier.

Korhonen, K-H, Lojander, M. 1988. Saven mekaaninen malli. III Suomen Mekaniikka-  
päivät 2.-3.6.1988. Otaniemi.

Korkiala-Tanttu, L. 1984. Konsolidoituvan ja hiipuvan maakerroksen painumisnopeus. Diplomityö. Otaniemi.

Kotzias, P. 1963. Die Zusammendrückbarkeit von Schluff. Mitteilung aus dem Insitut für Verkerswasserbau, Grundbau und Bodenmechanik der Teknischen Hochschule Aachen. Heft 28. Aachen.

Laaksonen, R & Lojander, M. 1985. RIL 157-2 Geomekaniikka 2, osa 12. Plastisuus-teoria maamekaniikassa. Suomen rakennusinsinöörien liitto. Helsinki, Suomi.

Lojander, M. 1985. RIL 157-1 Geomekaniikka 1, osa 3. Geomekaaniset ominaisuudet. Suomen rakennusinsinöörien liitto. Helsinki, Suomi.

Lojander, M. 1989. Saven mekaniisen mallin parametrien määrittäminen. Lisensiaatin-työ. Otaniemi.

Ohje, J. 1949. Vorbelastung und Vorspannung des Baugrundes und Ihr Einfluss auf setzung, Fastigkeit und Gleitwiderstand. Bautechnik, Bd 26. Heft 5. Berlin

Roscoe, K., Schofield, A. & Wroth, C. 1958. On the Yielding of Soils. Geotechnique Vol. 8 p. 22–53.

Roscoe, K. & Burland, J. 1968. On the generalised stress-strain behaviour of "wet" clay. Engineering Plasticity. Cambridge University Press. p. 553-609.

SFS 2011. Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 2: Pohjatutkimus ja koestus. SFS-EN 1997-2 + AC. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto SFS RY. ISBN 978-952-5650-59-4.

SFS-EN ISO 22475-1. 2006. Geotekninen tutkimus ja koestus. Näytteenottomenetelmät ja pohjavesimittaukset. Osa 1: Työn suorituksen tekniset periaatteet. Suomen Standardi-soimisliitto.

Schofield, A. & Wroth, P. 1968. Critical State Soil Mechanics. New York, United States of America: McGraw-Hill.

Schofield, A. 1980. Twentieth Rankine lecture: Cambridge geotechnical centrifuge op-erations. Geotechnique. Vol. 30, No. 3, p. 227-268.

Taylor, D. W. 1942. Research on consolidation of clays. Cambridge, Mass, Massachu-setts Institute of Technology.

Taylor, D. W. 1948. Fundamentals of Soil Mechanics. New York, John Wiley Sons.

Terzaghi, K. 1925. Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage. Leipzig & Wien.

Terzaghi, K & Fröhlich, O. 1936. Theorie der Setzung von Tonschichten. Leipzig & Wien.

Terzaghi, K. & Peck, R. P. 1948. Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley and Sons, New York.

Toivanen, T.-L. 1999. Modelling of the anisotropy of Otaniemi clay. Diplomityö. Otaniemi.

van Zelst, T. 1948. An Investigation of the Factors Affecting Laboratory Consolidation of Clay. Proc 2nd Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Vol VII. Rotterdam.

Whitman, R. V., Roberts, J. E., & Mao, S.-W. 1960. The response of soils to dynamic loadings: report 4: one-dimensional compression and wave velocity tests. Cambridge, Mass, Soil Engineering Division, Massachusetts Institute of Technology.

Whitman, R.V., Richardson, A.M., & Healy, K.A. 1961. Time-lags in Pore pressure Measurements. 5th. International Conference SMFE, p. 407-41. Paris.

Wood, D. M. 1990. Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics. Cambridge University Press, New York.

Yan-xu, Wen. & Jian-yong, Shi. 2005. Delay of Pore Pressure in Oedometer and its Effect on Determination of Coefficient of Consolidation. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. v. 24, no. 2, p. 357-364.

Shogaki, T. & Kaneko, M. 1993. Evaluation of Consolidation Parameters by Graphical Method. Proc. of the 3rd Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, June 1-4, paper no. 13.08

## Liiteluettelo

- Liite 1. Teknisen spesifikaation vaatimukset portaittai-selle ödometri- ja konsolidoidulle kolmiaksiaalikoekelle. 9 sivua.
- Liite 2. Esimerkki yhden ödometrikokeen portaan tulostuksesta. 3 sivua.
- Liite 3. Esimerkki ödometrikokeen tulostuksesta. 11 sivua.
- Liite 4. Esimerkki kolmiaksiaalikokeen tulostuksesta. 7 sivua

## **Liite 1. Teknisen spesifikaation vaatimukset portaittaiselle ödometri- ja konsolidoidulle kolmiaksiaalikokeelle**

### **Lyhyesti teknisistä spesifikaatioista**

Tässä kappaleessa käsitellään CENin teknisen spesifikaation asettamia vaatimuksia ja ohjeita portaittaisen ödometrikokeen (CEN ISO/TS 17892-5, 2007) ja konsolidoidun kolmiaksiaalikokeen (CEN ISO/TS 17892-9, 2007) suorittamiseen, laitteistoon ja tulosten tulkintaan. Vaatimuksista ja ohjeista käsitellään tärkeimmät kokeen suorittamisen ja pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratorion kannalta oleelliset kohdat. Yhteenveto läpikäytyistä vaatimuksista ja ohjeista sekä niiden täyttymisestä pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratoriossa on koottu ödometrikokeen osalta taulukkoon 3.1 ja konsolidoidun kolmiaksiaalikokeen osalta taulukkoon 3.2. Konsolidoidun kolmiaksiaalikokeen osalta tulee huomioida, että kyseinen tekninen spesifikaatio koskee

- isotrooppisesti konsolidoitua avointa koetta (CID)
- anisotrooppisesti konsolidoitua avointa koetta (CAD)
- isotrooppisesti konsolidoitua suljettua koetta (CIU)
- anisotrooppisesti konsolidoitua suljettua koetta (CAU).

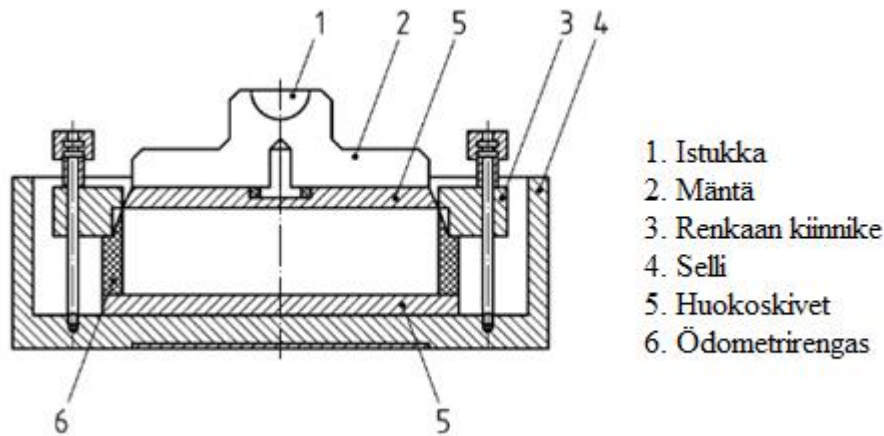
### **Vaatimukset portaittaisen ödometrikokeen laitteistolle**

Laitteiston vaatimukset käsittävät koelaitteen rungon ja sellin osineen. Leikkauskuva teknisessä spesifikaatiossa esitetystä tyypillisestä ödometrisestä ja sellin osista on esitetty liitteen 1 kuvassa 1. Pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratoriossa käytettävät portaittaisen ödometrikokeen laitteistot, täyttävät melkein kaikki näille asetetut vaatimukset.

Laboratoriossa on käytössä kahdenlaisia renkaita, alumiinisia ja messinkisiä. Alumiiniset renkaat täyttävät renkaille asetetut korkeuden, halkaisijan ja näitten suhteen vaatimuksen

- Halkaisijan on oltava vähintään 35 mm
- Korkeuden on oltava vähintään 12 mm
- Halkaisijan ja korkeuden suhde on oltava vähintään 2,5.

Alumiiniset renkaat ovat korkeudeltaan noin 20 mm ja halkaisijaltaan noin 50 mm täyttäen näin vaatimukset, kun taas messinkiset renkaat ovat korkeudeltaan 20 mm ja halkaisijaltaan noin 48 mm, jolloin suhteeksi tulee alle 2,4. Ero on kuitenkin pieni ja messinkiset renkaat välttämättömiä, koska yleisesti käytetyn näytteenottimen ST2-putken halkaisija on liian pieni alumiinisen renkaan käyttöön. Renkailta vaaditaan korroosiotomuutta ja jäykkyyttä tai tuentaa, jottei renkaan halkaisija laajene enempää kuin 0,05 % maksimikuormituksessa. Koska Laboratoriossa on käytössä kiinteärenkaisia ödometrisellejä (kuva 19), ei laajeneminen muodostu ongelmaksi. Käytettävät renkaat tulee myös merkitä tunnistenumeroilla, mikä tulee tehdä pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratoriossa. (CEN ISO/TS 17892-5, 2007, s.6)



**Liite 1 Kuva 1, Leikkauskuva ödometrisellistä ja sellin osista (CEN ISO/TS 17892-5, 2007, s.7.)**

Ödometrikokeessa käytettävien huokoskivien tulee olla korroosioitumattomia, hyvin vettä läpäiseviä, mutta estäen samalla näytteen tunkeutumisen kiveen ja kestäen maksimi kuormituksen vahingoittumattomina. Huokospaperia voidaan tarvittaessa käyttää ehkäisemään näytteen tunkeutumista kiveen. Kivien tulee olla halkaisijaltaan 0,5 mm rengasta pienempi, pehmeillä mailla halkaisija voi kuitenkin olla vain 0,2 mm pienempi. Uudet kivet tulee keittää tislatussa tai deionisoidussa vedessä ja tämän jälkeen säilyttää veden alla. Kivet tulee myös puhdistaa harjaamalla ja keittää jokaisen kokeen jälkeen. Huokoskivien osalta vaatimukset täyttyvät pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratoriossa korroosiottomuus- ja säilytysvaatimuksia lukuun ottamatta. Laboratoriossa on käytössä osaksi messinkisiä huokoskiviä, joitten säilytys veden alla aiheuttaa lievää korroosiota. Korvaavia vaihtoehtoja kiville ollaan hankkimassa. (CEN ISO/TS 17892-5, 2007, s.6-7)

Selliä, mäntää ja runkoa koskevat vaatimukset täyttyvät pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratoriossa. Nämä vaatimukset koostuvat pääosin tarpeeksi suuresta jäykkyydestä ja korroosiottomuudesta. Männässä tulee lisäksi olla reikiä vedenläpäisevyyttä varten, mikäli käytössä on alle 6 mm paksu huokoskivi. Rungon osalta esitetään myös vaatimus pystysuuntaisen kuorman tarkkuudesta, epätarkkuuden tulee olla parempi kuin 1 % tai 1kPa. Vaatimus täyttyy pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratoriossa, sillä rungon voiman välitys on mitattu ja käytettävät painot ovat tarpeeksi tarkkoja. (CEN ISO/TS 17892-5, 2007, s.8)

Lisäksi koko ödometrilaitteen muodonmuutos tulisi määrittää käyttämällä näytteen paikalla kokoonpuristumatonta kappaletta. Muodonmuutokset tulisi määrittää samoilla kuormituksilla, kuin itse koe tehdään ja koetuloksiin tulisi tehdä vastaavan suuruinen korjaus. Kalibrointi tulisi suorittaa säännöllisin väliajoin, mutta vähintään kerran vuodessa. Pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratoriossa ei tällä hetkellä kyseistä korjausta käytetä. Spesifikaatiossa mainitaan kuitenkin, että korjaus on luultavasti merkittävä vain suhteellisen lujilla näytteillä ja laboratoriossa tutkitaan pääosin pehmeitä savia. (CEN ISO/TS 17892-5, 2007, s.10)

### **Vaatimukset portaittaisen ödometrikokeen suoritukselle ja ympäristölle**

Kokeen suorituksen osalta tekninen spesifikaatio (CEN ISO/TS 17892-5, 2007) ohjeistaa näytteen valmistelua, miten näyte asennetaan renkaaseen näytteestä riippuen ja mitä mittauksia tulee tehdä. Ohjeistus jatkuu sellin kokoamisella, kokeen aloittamisella ja

kuormitusportaiden valitsemisella. Kuormituksen vaiheet ensikuormituksen, palautuksen ja toiston periaatteet käydään läpi ja lopuksi kokeen lopettaminen ja purkaminen. Tekninen spesifikaatio antaa perusteet rutiini kokeiden suorittamiseen. Pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratorioissa kokeet tehdään näytekohtaisesti, esimerkiksi kuormitusportaitten koko valitaan mahdollisimman sopivaksi, niinpä kokeitten suorittamiseen liittyviä vaatimuksia ei käydä tarkasti läpi tässä työssä. Teknisessä spesifikaatiossa on kohtia jotka tulisi ottaa huomioon pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratorioissa. Spesifikaatiossa on myös eräitä kohtia, joitten noudattamista tulisi välttää joissain tapauksissa suomalaisilla savilla.

Teknisessä spesifikaatiossa ohjeistetaan käyttämään kuivia huokoskiviä, mikäli näyte on taipuvainen imemään vettä itseensä, kuten jotkin savet. Kuivan huokoskiven käyttö voi kuitenkin johtaa huonompaan vedenläpäisevyyteen ja näin ollen virheelliseen tulokseen. Kuivien huokoskivien käyttämisen sijaan, voidaan näyte kuormittaa aluksi nopeammin niin, jolloin myös vältetään näytteen paisumiselta. Kun selli näytteineen asetetaan ödometrilaitteeseen, spesifikaatiossa sanotaan, että pieni enintään 3kPa:n alkupaine asetetaan näytteelle. Suomalaisilla savilla 3kPa:n paine vastaa kuitenkin usein jo ensimmäisen kuormitusportaan suuruutta. Kuormitusportaan kestoajalle suositellaan teknisessä spesifikaatiossa 24 tunnin aikaa, tulee kuitenkin huomioida, että alle vallitsevan jännityksen olevilla kuormitusportailta 15 minuutista yhteen tuntiin on sopiva kuormitusaika, joka ehkäisee myös mahdollista näytteen paisumista. (CEN ISO/TS 17892-5, 2007, s.12)

Merkittävin parannustarve pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratorioissa liittyy koeympäristön vaatimuksiin. Teknisen spesifikaation mukaan koeympäristön lämpötila tulee pitää  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  sisällä, lisäksi ympäristön maksimi- ja minimilämpötila tulee kirjata päivittäin (CEN ISO/TS 17892-5, 2007, s.10.). Pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratorion koehuoneen ilmanvaihtojärjestelmän tehot eivät riitä pitämään huonetta kesäpäivinä tasalämpöisenä, eikä tällä hetkellä ole automaattista lämpötilan seurantaa. Lämpötiloja seurataan ja kirjataan kuitenkin koekohtaisesti manuaalisesti korkeusluemien yhteydessä ja muuten kuin kesäisin vaatimus yleensä täyttyy normaali pituisilla (noin 2vk) kokeilla.

### **Vaatimukset portaittaisen ödometrikokeen tulkinneille ja raportille**

Koetulkinnan vaatimuksia ei käydä läpi yksityiskohtaisesti, sillä pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratorioissa on vuosien kokemus tulosten tulkinnasta ja tulkinta noudattaa teknisessä spesifikaatiossa annettuja ohjeita.

Koeraportin osalta teknisen spesifikaation osalta kokeesta vaaditaan vähintään seuraavia asioita (CEN ISO/TS 17892-5, 2007, s.18)

- Toteamuksen että koe suoritettiin teknisen spesifikaation ohjeitten mukaan
- Koko näytteen tiedot mm. näytteenottoaika, näytteen tai esim. putken numero, syvyys
- Koenäytteen syvyys tai kohta koko näytteestä
- Koelaitteen ja koejärjestelyn kuvaus: kiinteä- vai vapaarengas, yksi- vai kaksisuuntainen kuivatus, huokospaperin käyttö, ödometrienkaassa käytettävä liukaste, kalibroinnit
- Koenäytteen alkumitat
- Koenäytteen vesipitoisuus, tiheys ja kuivatiheys ennen koetta
- Paisumisaine mikäli havaittu



- Kaikkien kuormitusportaitten pisteet muodonmuutos-jännitys kuvaajassa
- Laboratorion lämpötila kokeen aikana.

Suurin osa teknisen spesifikaation testiraporttia koskevista vaatimuksista täyttyy pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratorion yleisessä testiraportissa. Raporttia ei kirjoiteta erikseen jokaiselle kokeella, mutta kokeitten tulokset kirjoitetaan yhteenveto lomakkeelle, mistä selviää tärkeimmät parametrit ja koekohtaiset tiedostot lähetetään mukana. Testiraportissa ei kuitenkaan ole ilmoitettu kokonäytteen esim. putken koko syvyyttä vaan vain koenäytteen syvyys. Koelaitteesta ilmoitetaan laitteen numero, muttei laitekuvausta, myöskään liukasteen tai huokospaperien käyttöä ei mainita. Näytteen tiheyttä ei määritetä ödometrinäytteen ympäriltä saatavasta näytteestä (CEN ISO/TS 17892-5, 2007, s.11.), sillä käytettävä liukaste voi vaikuttaa tulokseen, sen sijaan putkesta ennen ödometrikoenäytettä otetaan näyte, josta määritetään perusluokitustiedot. Myös laboratorion lämpötila tulee lisätä testiraporttiin.

**Taulukko 8.1, Teknisen spesifikaation vaatimukset portaittaiselle ödometrikokeelle**

CENin teknisessä spesifikaatiossa ISO/TS 17892-5, 2007 asetettu vaatimus	Vaatimuksen täyttyminen pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratoriossa
Portaittaisen ödometrikokeen laitteistoa koskevat vaatimukset	
Renkaan halkaisija vähintään 35 mm Renkaan korkeus vähintään 12 mm Renkaan halkaisijan ja korkeuden suhde vähintään 2,5	Teräsrenkailla ehdot täytyvät. Messinkirenkailla halkaisijan ja korkeuden suhde on 2,4.
Renkaiden korroosiottomuus	Vaatimus täyttyy
Renkaan halkaisija ei saa laajeta enempää kuin 0,05 % maksimikuormituksessa	Vaatimus täyttyy
Renkaat tulee olla merkitty tunnistenumrolla	Vaatimus ei täyty, mutta renkaat punnitaan, sekä renkaitten sopivuus sellin muiden osien kanssa tarkastetaan ennen jokaista koetta.
Huokoskivien tulee olla korroosiottomia	Vaatimus ei täyty messinkisten huokoskivien osalta.
Huokoskivien tulee olla hyvin vettä läpäiseviä, mutta estää näytteen tunkeutuminen kiveen	Vaatimus täyttyy
Huokoskivien tulee kestää maksimikuorma vahingoittumatta	Vaatimus täyttyy
Uudet huokoskivet ja aina kokeen jälkeen huokoskivet tulee keittää vedessä	Vaatimus täyttyy
Kokeiden välillä huokoskivet tulee säilyttää vedessä	Vaatimus ei täyty messinkisten kivien osalta, sillä säilytys vedessä aiheuttaa lievää korroosiota
Sellin, männän ja rungon vaatimus tarpeeksi suuresta jäykkyydestä ja korroosiottomuudesta	Vaatimus täyttyy
Ödometrilaitteen kokonaismuodonmuutoksen määrittäminen, korjauksen käyttäminen laskennassa ja korjauksen tarkistaminen vähintään vuosittain.	Vaatimus ei täyty. Kuitenkin spesifikaation mukaan korjaus on luultavasti merkittävä vain suhteellisen lujilla materiaaleilla.

CENin teknisessä spesifikaatiossa ISO/TS 17892-5, 2007 asetettu vaatimus	Vaatimuksen täyttyminen pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratoriossa
Portaittaisen ödometrikokeen suoritusta ja ympäristöä koskevat vaatimukset	
Kokeen suorittamiseen liittyvät vaatimukset liittyen näytteen valmisteluun, sellin koamiseen, kokeen aloittamiseen ja suoritukseen, kuormitusportaiden suuruuteen ja aikaan ja kokeen lopettamiseen.	Kokeen suorittamiseen liittyvät vaatimukset toteutuvat hyvin. Voidaan jopa sanoa, että laboratoriossa tietyt asiat tehdään paremmin kuin spesifikaatiossa neuvotaan.
Kokeen ympäristön lämpötilan pysyminen $\pm 2^{\circ}\text{C}$ sisällä ja lämpötilan maksimi ja minimilämpötilojen kirjaus päivittäin	Vaatus ei täyty tällä hetkellä lähinnä kesäisin, jolloin lämpötila nousee liian korkealle. Lämpötilojen kirjauksen automatisointi on ollut suunnitelmissa.
Portaittaisen ödometrikokeen tulkintaa ja koeraporttia koskevat vaatimukset	
Koetulkintaa koskevat vaatimukset	Vaatimukset täyttyvät
Koeraporttia koskevat vaatimukset, vaatimukset lueteltu kohdassa 1.3	Vaatimukset täyttyvät suurelta osalta. Täyttymättömät vaatimukset koskevat kokonäytteen kaikkien tietojen merkitsemistä, koelaitteen ja suorituksen kuvausta esim. käytetty liukaste, huokospaperin käyttö, kalibroinnit sekä lämpötilan merkitsemistä.

### Vaatimukset konsolidoidun kolmiaksiaalikokeen laitteistolle

Laitteiston vaatimukset koskevat selliä, näytteen ympäröivää membraania, huokoskiviä, huokospaperia, koelaitteen raamia sekä voiman, tilavuudenmuutoksen, huokos- ja sellipaineen mittaukseen vaadittavia laitteita, kuvassa 20 esitetään tavallinen kolmiaksiaalikokeen selli ja mittauslaitteisto. Pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratorion kahdesta tällä hetkellä käytössä olevasta kolmiaksiaalilaitteesta voidaan sanoa, että laitteiston vaatimukset täyttyvät lukuun ottamatta huokoskivien käsittelyä ja tilavuuden muutokseen ja käytettävien membraanien ominaisuuksiin liittyviä selvitettäviä asioita. (CEN ISO/TS 17892-9, 2007)

Sellin tulee kestää käytettävä sellipaine ilman huomattavaa sellinesteen vuotoa, sellin tulisi myös olla läpinäkyvä. Männän tulee kulkea vapaasti ja pysyä suorassa asennossa, lisäksi männän ja ylä- ja alalevyn kokoonpuristuman tulee olla merkityksellisiä näytteen kokoonpuristumaan nähden. Näytteen ala- ja yläpuolelle tulevien levyjen, hattujen tulee myös olla samankokoisia halkaisijaltaan kuin näytteen. Selliä, määntää ja levyjä koskevat vaatimukset täyttyvät pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratorion käytössä olevissa laitteissa. (CEN ISO/TS 17892-9, 2007, s. 7-8)

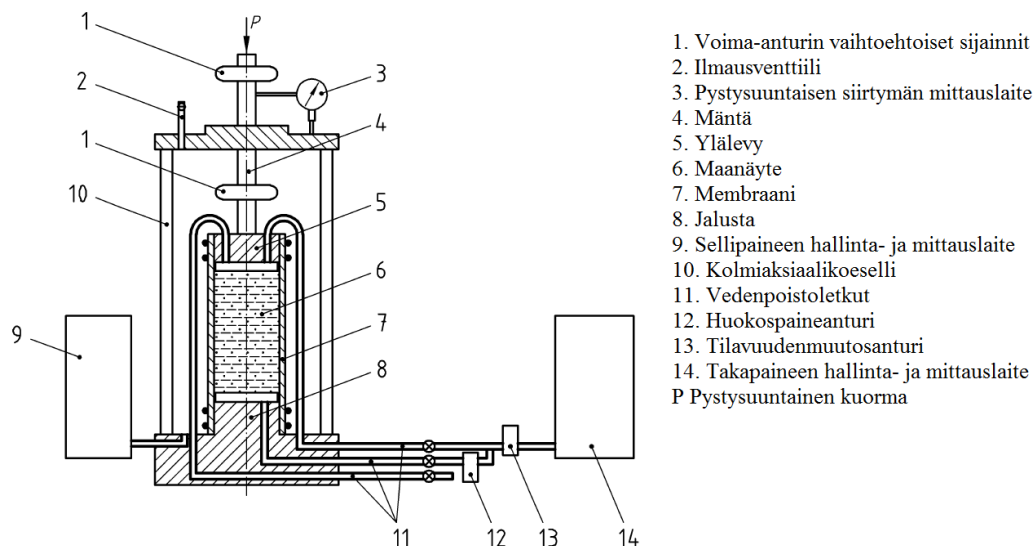
Näytteen sellivedestä erottavan membraanin tulee tehokkaasti estää sellinesteen pääsy näytteeseen. Membraanin ja huokospaperiliuskojen yhteisvaikutus murtovoimaan ei saa enempää kuin 10% deviatoriseen jännitykseen. Membraanin venyttämättömän halkaisijan tulee olla 95-100% näytteen halkaisijasta, membraanin paksuus ei saa olla enempää kuin 1% näytteen halkaisijasta, eikä sen vedossa määritetty moduuli saa olla enempää kuin 1600kPa. Membraanien laadunvarmistukseen ja testaamiseen tulee kiinnittää enemmän huomiota pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratoriossa. (CEN ISO/TS 17892-9, 2007, s. 8)

Kokeessa käytettävien huokoskivien tulee olla halkaisijaltaan samankokoisia kuin näytteen ja pintojen tulee olla sileät. Kiviä tulisi spesifikaation mukaan keittää 10 minuuttia tislatussa vedessä ja säilyttää tämän jälkeen kaasuttomassa vedessä. Huokoskivien säilytyksen osalta vaatimus ei sellaisenaan täyty pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorioissa, kivet kuitenkin nykyään käytetään tyhjiössä ennen koetta, jolloin kivet kylästyvät täysin. (CEN ISO/TS 17892-9, 2007, s. 9.)

Voiman, siirtymän, tilavuudenmuutoksen, selli- ja huokospaineen mittauksien tarkkuuksista annetaan seuraavat vaatimukset teknisessä spesifikaatiossa

- Voima tulee pystyä mittaamaan  $\pm 3$  %:n tai  $\pm 1$  N:n tarkkuudella, suuremman arvon mukaan (CEN ISO/TS 17892-9, 2007, s. 8.).
- Siirtymä eli näytteen kokoon puristuma tulee olla luettavissa  $\pm 0,015$  %:n tarkkuudella näytteen alkukorkeudesta (CEN ISO/TS 17892-9, 2007, s. 10.).
- Tilavuudenmuutos tulee olla luettavissa  $\pm 0,05$  %:n tarkkuudella näytteen alkutilavuudesta (CEN ISO/TS 17892-9, 2007, s. 10.).
- Selli- ja huokospaine tulee olla luettavissa  $\pm 2$  %:n tai  $\pm 1$  kPa:n tarkkuudella, suuremman arvon mukaan (CEN ISO/TS 17892-9, 2007, s. 9.).

Mittauksien tarkkuusvaatimukset toteutuvat pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorioissa.



**Kuva 8.1, Havainnekuva kolmiakksiaalikokeen tyypillisestä laitteistosta (CEN ISO/TS 17892-9, 2007, s. 7.)**

### Vaatimukset konsolidoidun kolmiakksiaalikokeen suoritukselle

Teknisessä spesifikaatiossa käydään läpi laitteiston ja näytteen valmistelu, kokeen suoritus ja purkaminen. Vaatimukset koskevat mm. näytteen vähimmäiskokoa ja koon mittauksen tarkkuutta, vuotojen tarkistamista, näytteen käsittelyä, laitteiston saturointia ja saturoinnin tarkastamista, kokeessa käytettäviä leikkausnopeuksia ja näytteelle tehtäviä toimenpiteitä kokeen purkamisen jälkeen. Pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratorion toimenpiteet konsolidoitua kolmiakksiaalikoetta suorittaessa vastaavat lähes täydellisesti teknisen spesifikaation vaatimuksia, tämän takia vaatimuksia ei käydä tarkasti läpi. Huomiota kuitenkin kiinnitetään pariin yksityiskohtaan teknisessä spesifikaatiossa. (CEN ISO/TS 17892-9, 2007, s. 10–17)

Teknisessä spesifikaatiossa neuvotaan tarkistamaan huokoskivien läpäisevyys puhaltamalla ilmaa kivien läpi (CEN ISO/TS 17892-9, 2007, s. 11.), kivien kuitenkin tulisi

nimenomaan olla täysin kyllästyneitä, joten parempi vaihtoehto läpäisevyyden testaamiselle olisi muuttuvaputouskoe, joka voidaan suorittaa aina ennen ja/tai jälkeen kolmiaksiaalikokeen.

Kokeen jälkeen tulisi teknisen spesifikaation mukaan ainakin yhdestä sarjaan kuuluvasta kokeesta määrittää rakeisuus (CEN ISO/TS 17892-9, 2007, s. 17), näytteen valmistelun yhteydessä käytetään kuitenkin liukasteainetta, joka saattaa vaikuttaa rakeisuuden määrittämiseen. Rakeisuus kuitenkin määritetään jokaisesta näyteputkesta ottamalla näytettä luokituskokeisiin ennen kolmiaksiaalikoenäytettä.

### **Vaatimukset konsolidoidun kolmiaksiaalikokeen tulkinneille ja raportille**

Pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratorion koetulkinta vastaa hyvin teknisen spesifikaation sille asettamia vaatimuksia. Vaatimukset koskevat perusparametrien määrittämiä kokeen alussa kuten vesipitoisuutta ja tiheyttä ja eri jännityksien laskemista kokeen eri vaiheissa. Teknisessä spesifikaatiossa kuitenkin edellytetään korjauskaavoja pysty- ja vaakajännitykselle. Nämä korjaukset johtuvat näytteen eristävästä membraanista (CEN ISO/TS 17892-9, 2007, s. 20, kaava 15 ja 16) ja näytteen pinnalle asetettavista konsolidaationopeutta edistävistä huokospaperi suikaleista (CEN ISO/TS 17892-9, 2007, s. 21, kaava 17 ja 18). Huokospaperin korjauskaavoja tarvitsee käyttää vain leikkauksvaiheessa.

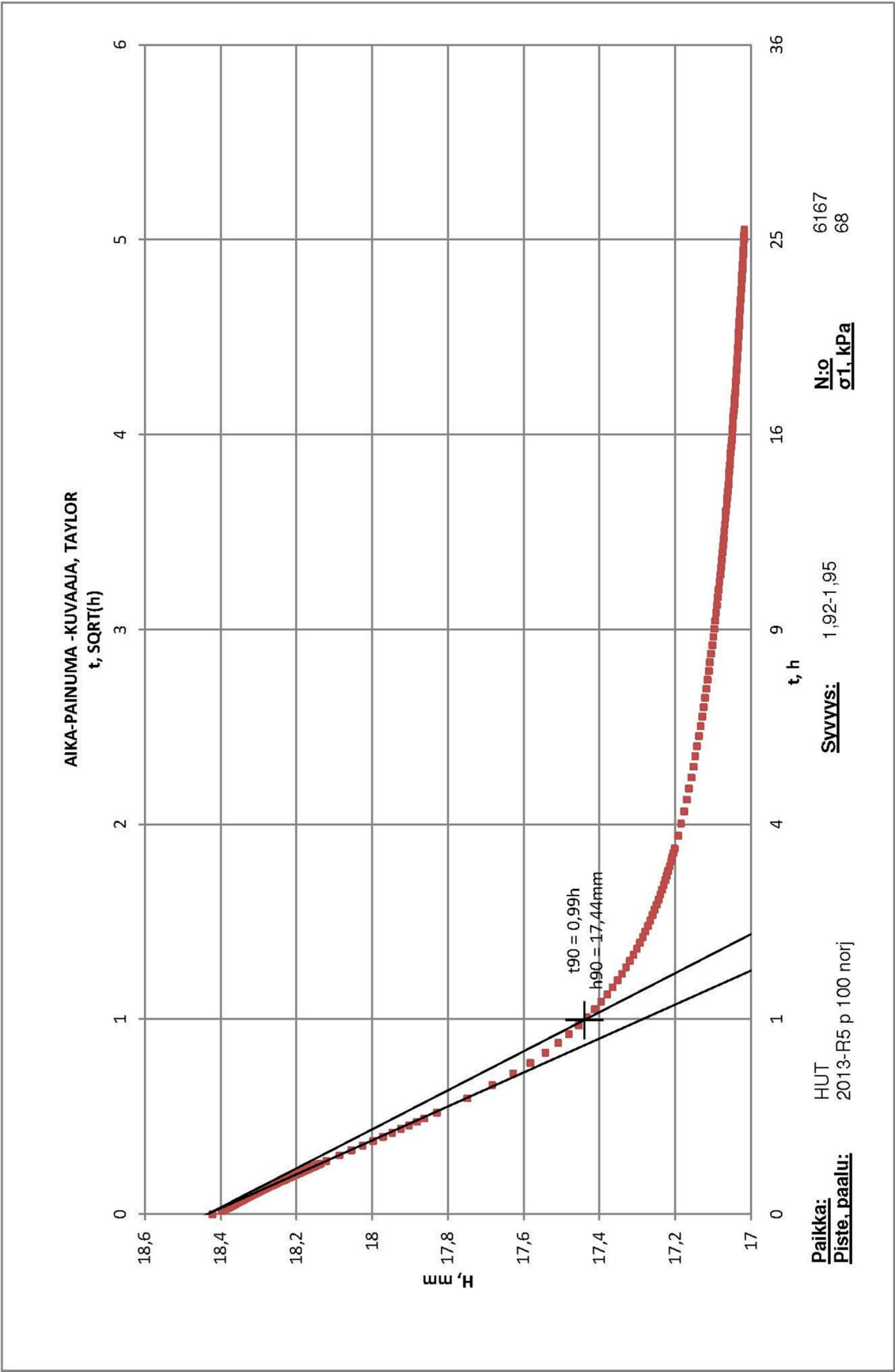
Koeraportin osalta tekninen spesifikaatio vaatii kirjaamaan koeraporttiin mm. käytetyn koemenetelmän, perustiedot näytteestä, näytteen valmistustavan, näytteen luokitustiedot, näytteen muodonmuutokset konsolidoinnin ja leikkauksen jälkeen, murtojännityksen ja vastaavan huokospaineen suljetussa kokeessa, leikkausnopeuden, murtomekanismin selvittävän piirroksen tai kuvan näytteestä, koelaitteiston kuvauksen, selvityksen poikkeamista teknisen spesifikaation vaatimuksista. Lisäksi koeraporttiin tulee sisällyttää tietyt kuvaajat kuten deviatorinen jännitys pystysuuntaisen muodonmuutoksen funktiona. Pohjarakennuksen ja maamekaniikan koetulostus sisältää melkein kaikki vaaditut kohdat. Lisättävää laboratorion koeraporttiin olisi ainakin toteamus kokeen suorittamisesta teknisen spesifikaation vaatimuksien mukaisesti, kuvaus laitteesta ja selvitys poikkeamista teknisen spesifikaation vaatimuksista. (CEN ISO/TS 17892-9, 2007, s. 21–23)

**Taulukko 8.2, Teknisen spesifikaation vaatimukset konsolidoidulle kolmiaksiaalikoelle**

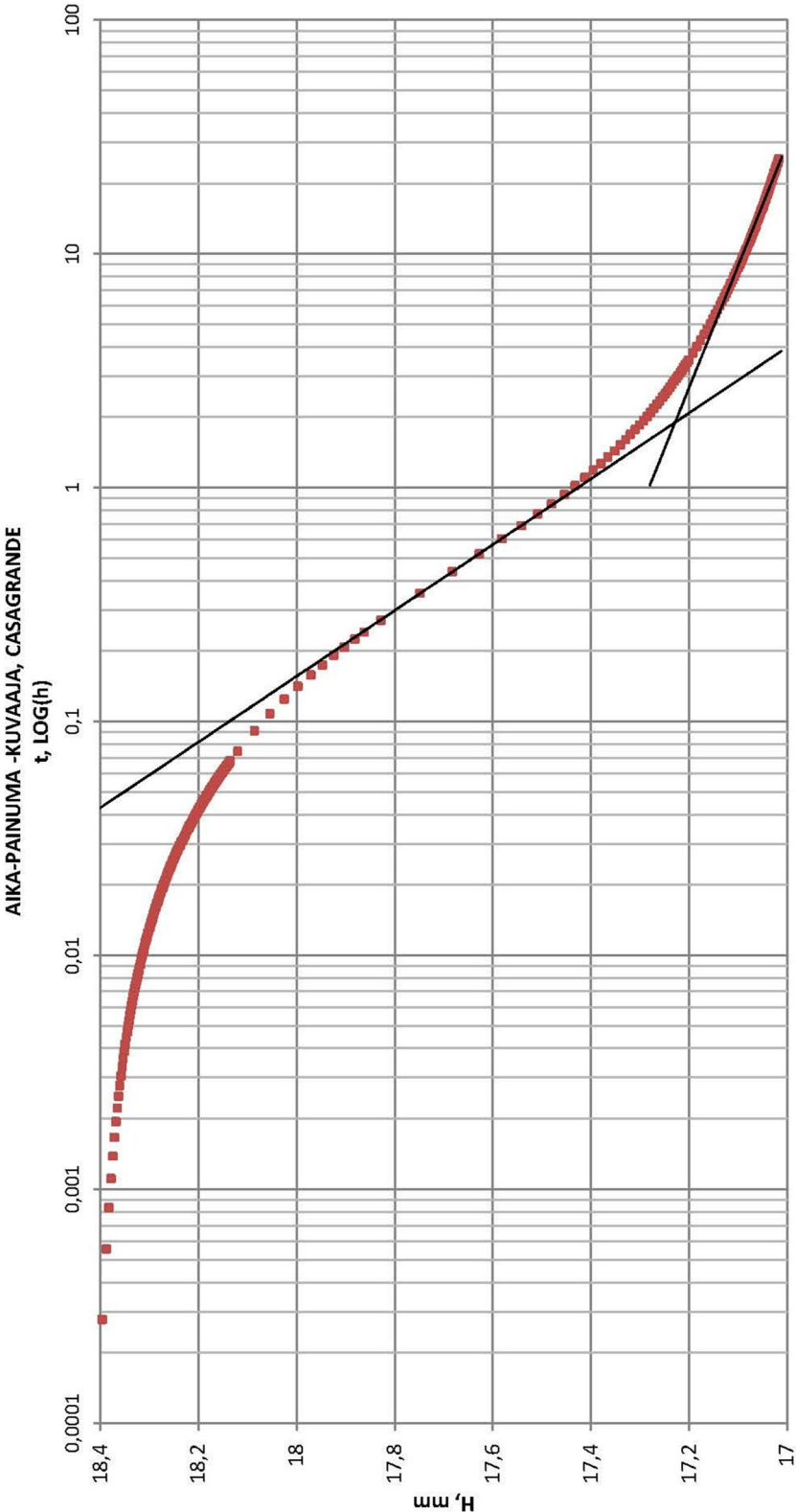
CENin teknisessä spesifikaatiossa ISO/TS 17892-9, 2007 asetettu vaatimus	Vaatimuksen täyttyminen pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratoriossa
Konsolidoidun kolmiaksiaalikokeen laitteistoa koskevat vaatimukset	
Sellin tulee kestää konsolidointipaine ilman huomattavia sellinesteen vuotoja	Vaatimus täyttyy
Männän tulee kulkea vapaasti selliin ja pysyä pystysuorassa asennossa	Vaatimus täyttyy
Männän, näytteen ylä- ja alalevyn kokoonpuristuman kuormituksessa tulee olla merkityksetön näytteen kokoonpuristumaan verrattuna	Vaatimus täyttyy
Ylä- ja alalevyjen halkaisijoiden tulee olla yhtäsuuria kuin näytteen halkaisija	Vaatimus täyttyy, näytteet joilla on suurempi halkaisija, muokataan 16-kulmaisiksi
Membraanin ja huokospaperiliuskojen yhteisvaikutus murtokuormaan saa olla enintään 10%	Membraania koskevat vaatimukset luultavasti täyttyvät, mutta vaatimuksien tarkistaminen, etenkin moduulin, käytettävillä membraaneilla tulee tehdä
Membraanin halkaisijan tulee olla venyttämättömänä 95-100% näytteen halkaisijasta ja membraanin paksuuden 1% näytteen halkaisijasta	
Membraanin vedossa määritetty moduuli saa olla korkeintaan 1600 kPa	
Huokoskivien halkaisijoiden tulee olla näytteen halkaisijan suuruisia ja pintojen sileät	Vaatimus täyttyy
Huokoskivet tulee keittää tislatussa vedessä ja säilyttää tämän jälkeen kaasuttomassa vedessä	Vaatimus ei täyty, mutta kivet kyllästetään imemällä niistä ilma pois tyhjiössä ennen koetta
Voima tulee pystyä mittaamaan $\pm 3$ %:n tai $\pm 1$ N:n tarkkuudella, suuremman arvon mukaan	Vaatimus täyttyy
Siirtymä eli näytteen kokoon puristuma tulee olla luettavissa $\pm 0,015$ %:n tarkkuudella näytteen alkukorkeudesta	Vaatimus täyttyy
Tilavuudenmuutos tulee olla luettavissa $\pm 0,05$ %:n tarkkuudella näytteen alkutilavuudesta	Vaatimus täyttyy
Selli- ja huokospaine tulee olla luettavissa $\pm 2$ %:n tai $\pm 1$ kPa:n tarkkuudella, suuremman arvon mukaan	Vaatimus täyttyy

CENin teknisessä spesifikaatiossa ISO/TS 17892-9, 2007 asetettu vaatimus	Vaatimuksen täyttyminen pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratoriossa
Konsolidoidun kolmiaksiaalikokeen suoritusta koskevat vaatimukset	
Vaatimukset koskevat mm. näytteen vähimmäiskokoa ja koon mittauksen tarkkuutta, vuotojen tarkistamista, näytteen käsittelyä, laitteiston saturointia ja saturoinnin tarkastamista, kokeessa käytettäviä leikkausnopeuksia ja näytteelle tehtäviä toimenpiteitä kokeen purkamisen jälkeen.	Vaatimukset täyttyvät, lukuun ottamatta kokeen jälkeen tehtävää rakeisuusmäärittystä. Rakeisuusmäärittystä ei voida tehdä näytteestä, sillä näytteen käsittelyn aikana käytetään liukasteita. Rakeisuus kuitenkin määritetään samasta putkesta ennen kolmiaksiaalikoehenäytettä.
Konsolidoidun kolmiaksiaalikokeen koetulkintaa ja koeraporttia koskevat vaatimukset	
Koetulkinnan vaatimukset koskevat perusparametrien määrittämiä kokeen alussa kuten vesipitoisuutta ja tiheyttä ja eri jännityksien laskemista kokeen eri vaiheissa.	Vaatimukset täyttyvät lukuun ottamatta membraanin ja houkospaperiliuskojen korjauskertoimien käyttämistä jännityksille. Tarpeelliset kaavat on esitetty teknisessä spesifikaatiossa ja ne tullaan ottaa käyttöön.
Koeraportin osalta vaatimuksiin kuuluu mm. käytetyn koemenetelmän, perustiedot näytteestä, näytteen valmistustavan, näytteen luokitustiedot, näytteen muodonmuutokset konsolidoinnin ja leikkauksen jälkeen, murtojännityksen ja vastaavan huokospaineen suljetussa kokeessa, leikkausnopeuden, murtomekanismin selvittävän piirroksen tai kuvan näytteestä, koelaitteiston kuvauksen, selvityksen poikkeamista teknisen spesifikaation vaatimuksista. Lisäksi koeraporttiin tulee sisällyttää tietyt kuvaajat kuten deviatorinen jännitys pystysuuntaisen muodonmuutoksen funktiona (CEN ISO/TS 17892-9, 2007, s. 21–23).	Vaatus täyttyy melkein kaikilta osilta. Laboratorion koeraporttiin tulee kuitenkin lisätä ainakin toteamus kokeen suorittamisesta teknisen spesifikaation vaatimusten mukaisesti, kuvaus laitteesta ja selvitys poikkeamista teknisen spesifikaation vaatimuksista.

<b>Paikka:</b>	HUT						<b>N:o</b>	6167	
<b>Piste, paalu:</b>	2013-R5 p 100 norj				<b>Syvyys:</b>	1,92-1,95			
<b>Ödometri:</b>									
<b>Laite nro</b>	ÖD5	$h_0$ , cm	2,0	$A$ , cm <sup>2</sup>	20	$V$ , cm <sup>3</sup>	40,00	$\sigma_1$ , kPa	68
<b>Huom.</b>									
<b>Näyte:</b>									
<b>Maalaji</b>	laSa	Sa-%	82	<b>Humus, %</b>	0	$\rho_s$ , t/m <sup>3</sup>	2,78	$\gamma_0$ , kN/m <sup>3</sup>	15,42
$w_0$ , %	78,9	$e_0$	2,164	$n_0$ , %	68,4	$s_k$ , kPa		$S_t$	
$S_{r1}$ , %	100	F		$w_L$ , %		$w_{p1}$ , %		$I_p$	
<b>Konsolidaatiokertoimet:</b>									
<b>Taylorin määritelmä:</b> $c_v = 0,848 \cdot H^2 / t_{90}$ , $H = H_{50}/2$									
<b>KUVA 2:</b>						<b>Konsolidaatiokerroin <math>c_v</math>:</b>			
$H_0$ (mm)	$H_{90}$ (mm)	$H_{100}$ (mm)	$H_{50}$ (mm)	$t_{90}$ (h)		$1,90 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$			
18,43	17,44	17,33	17,88	0,99		$0,60 \text{ m}^2/\text{a}$			
<b>Jännitysväli [kPa]:</b> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">34</span> =====> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">68</span>									
<b>Kokoonpuristuvuusmoduuli</b>		$M_s =$	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">616</span>		<b>kPa</b>				
<b>Vedenläpäisevyyskerroin</b>		$k =$	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0,3082</span>		$\cdot 10^{-9} \text{ m/s}$				
<b>Casagranden määritelmä:</b> $c_v = 0,196 \cdot H^2 / t_{50}$ , $H = H_{50}/2$									
<b>KUVA 1:</b>						<b>Konsolidaatiokerroin <math>c_v</math>:</b>			
$H_0$ (mm)	$H_{100}$ (mm)	$H_{50}$ (mm)	$t_{50}$ (h)			$1,55 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$			
18,41	17,23	17,82	0,28			$0,49 \text{ m}^2/\text{a}$			
<b>Jännitysväli [kPa]:</b> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">34</span> =====> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">68</span>									
<b>Kokoonpuristuvuusmoduuli</b>		$M_s =$	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">573</span>		<b>kPa</b>				
<b>Vedenläpäisevyyskerroin</b>		$k =$	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0,2708</span>		$\cdot 10^{-9} \text{ m/s}$				
<b>sekundääripainuman kerroin:</b>									
$\varepsilon_\alpha = c_{\varepsilon\alpha} = $ <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0,96</span> %									







6167  
68

$\frac{N:0}{\sigma'1, \text{ kPa}}$

1,92-1,95

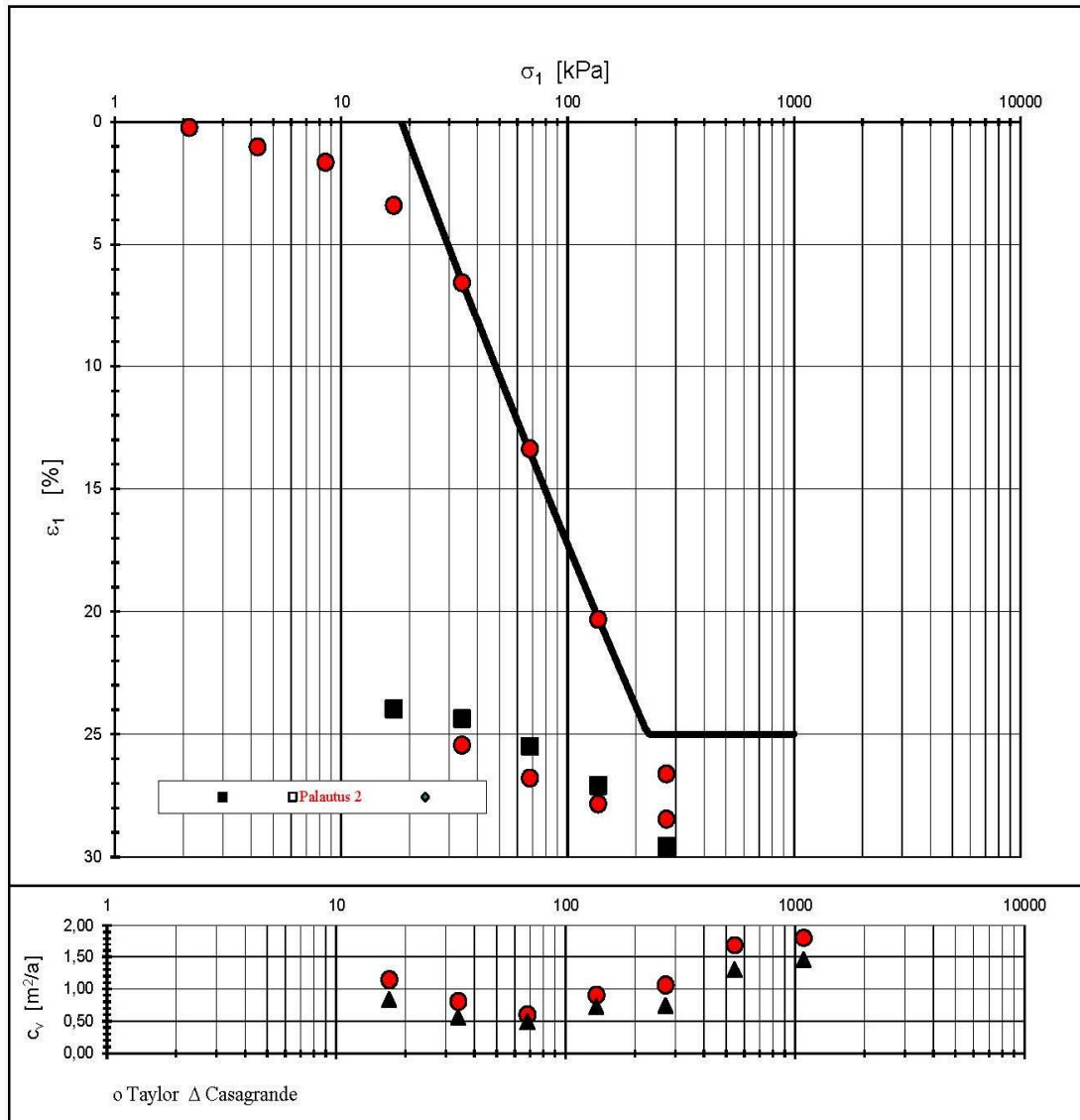
Syvyys:

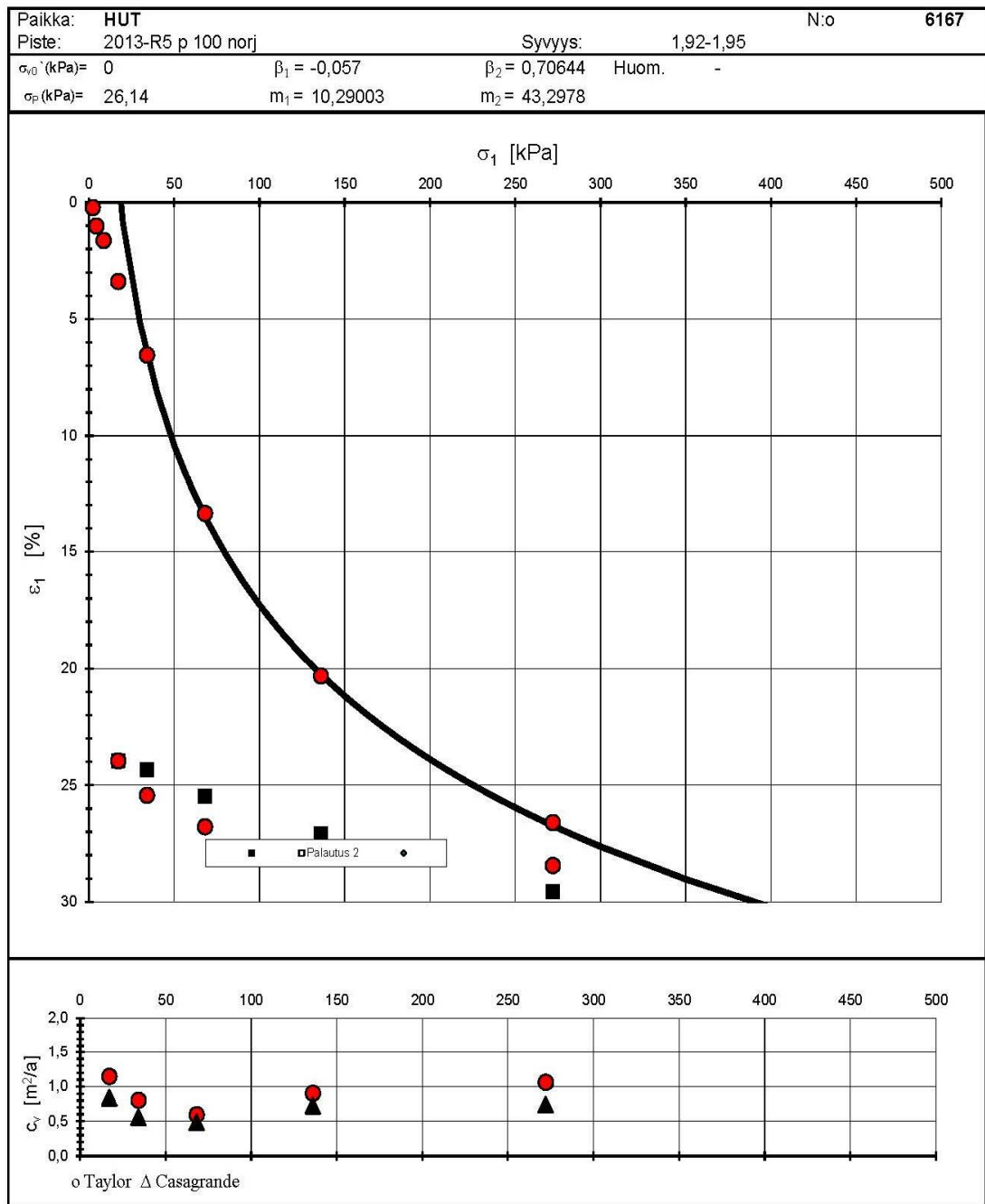
HUT  
2013-R5 p 100 norj

Paikka:  
Piste, paalu:

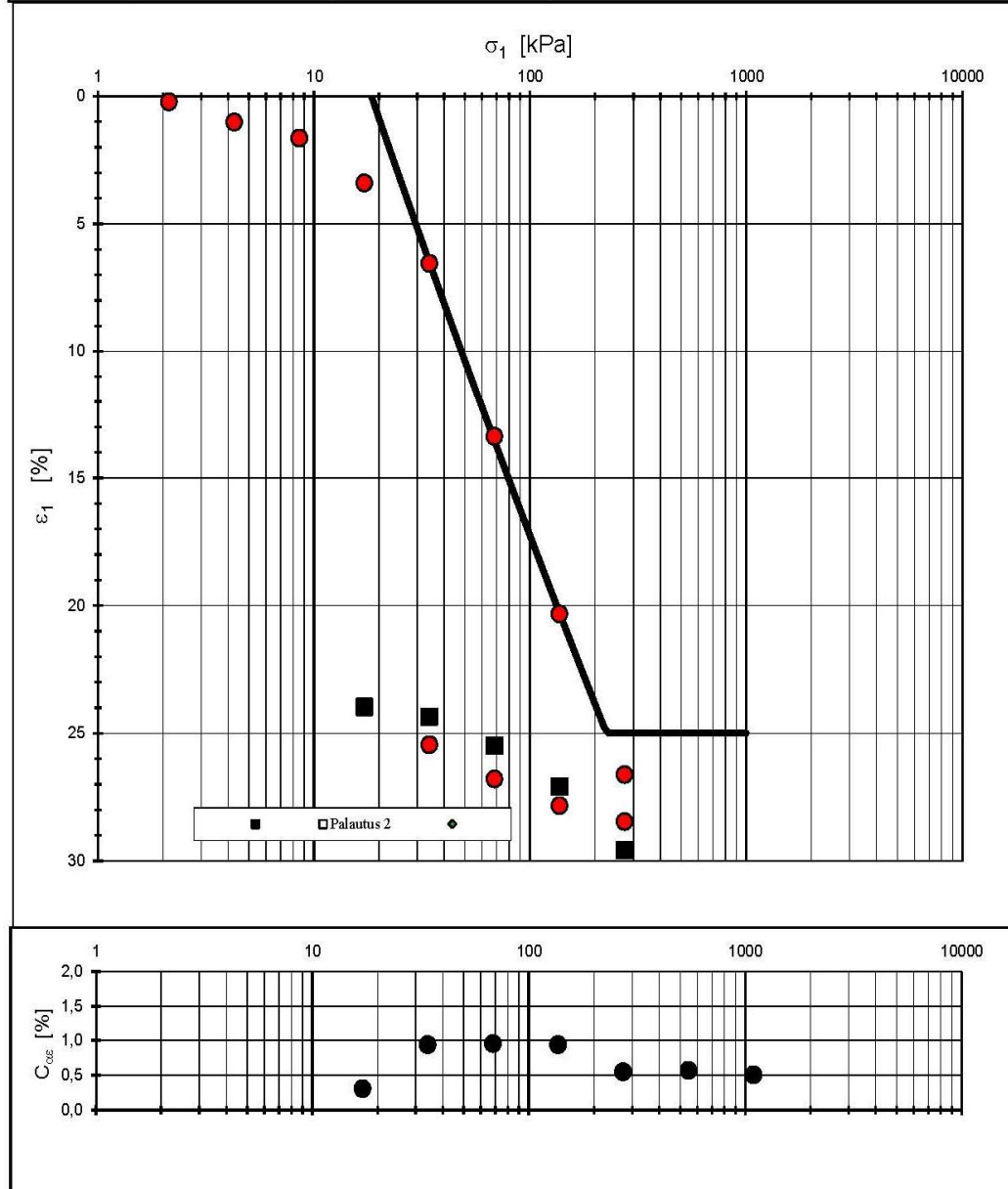


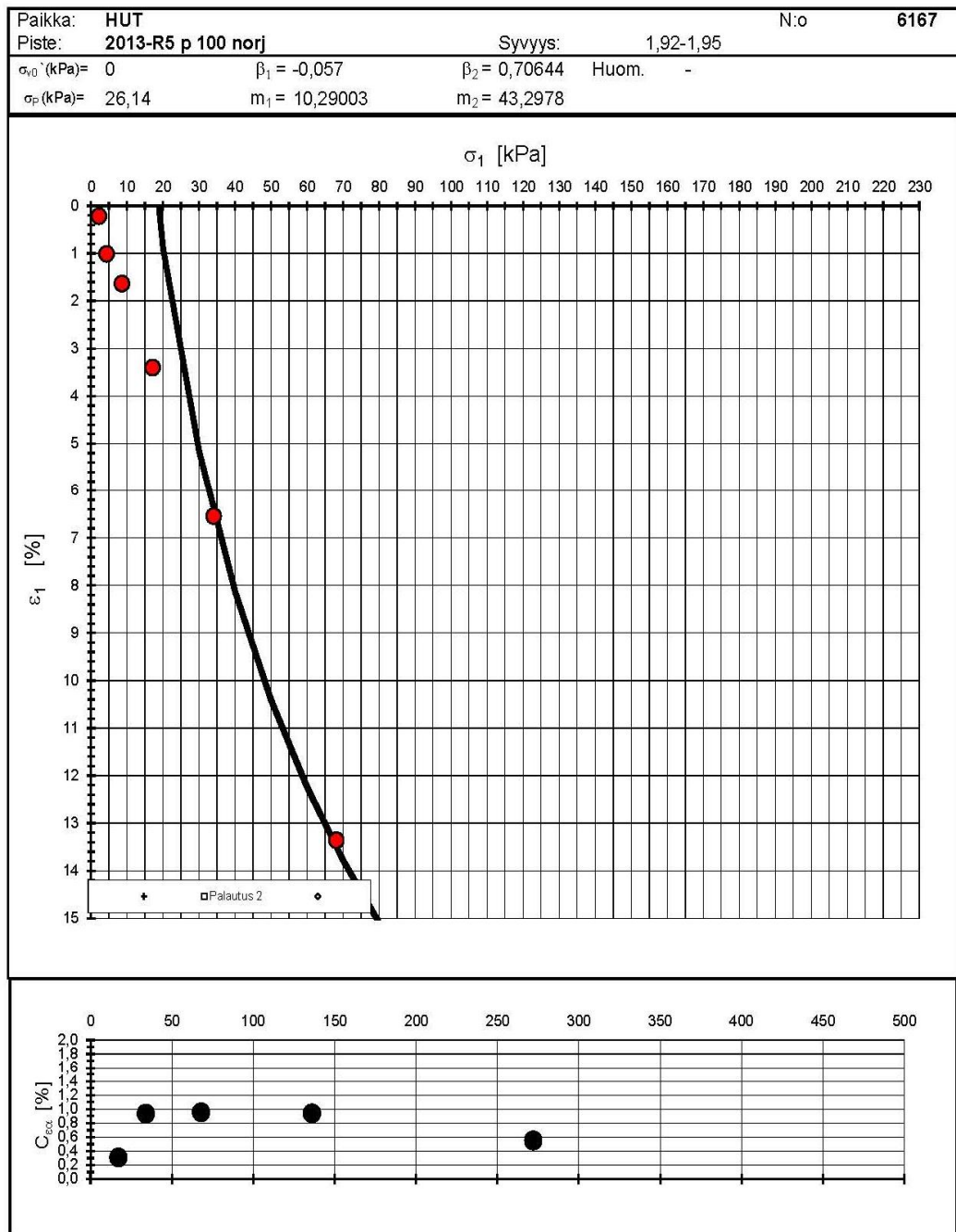
Paikka:	HUT	Syvyys:	1,92-1,95	N:o	6167
Piste:	2013-R5 p 100 norj				
$\sigma_{v0}$ (kPa)=	0	$\beta_1 = -0,057$	$\beta_2 = 0,70644$	Huom.	-
$\sigma_p$ (kPa)=	26,14	$m_1 = 10,29003$	$m_2 = 43,2978$		





Paikka:	HUT	Syvyys:	1,92-1,95	N:o	6167
Piste:	2013-R5 p 100 norj				
$\sigma_{v0}$ (kPa)=	0	$\beta_1 = -0,057$	$\beta_2 = 0,70644$	Huom.	-
$\sigma_p$ (kPa)=	26,14	$m_1 = 10,29003$	$m_2 = 43,2978$		





pvm.							28.2.2013	
Paikka:	HUT						N:o	6167
Piste:	2013-R5 p 100 norj			Syvyys:	1,92-1,95			
Odometri:								
Laite nro	ÖD5	h <sub>0</sub> , cm	2,0	A, cm <sup>2</sup>	20,0	V <sub>0</sub> , cm <sup>3</sup>	40,0	
Huom.	-							
Näyte:								
Maalaji	laSa	Sa-%	82	Humus,%	0	ρ <sub>s</sub> , t/m <sup>3</sup>	2,78	γ <sub>0</sub> ,kN/m <sup>3</sup>
w <sub>0</sub> , %	78,9	e <sub>0</sub>	2,164	n <sub>0</sub> , %	68,4	s <sub>k</sub> , kPa		S <sub>t</sub>
S <sub>r</sub> , %	100	F		w <sub>L</sub> , %		w <sub>p</sub> , %		I <sub>p</sub>

\*  $H_{50}$ - ja  $k$ -arvot Cvk.xls tiedostoista

$\sigma_1$ kPa	$c_v$ (T) m <sup>2</sup> /a	$c_v$ (C) m <sup>2</sup> /a	$H_{50}$ (T) mm	$H_{50}$ (C) mm	$k$ (T) *10 <sup>-9</sup> m/s	$k$ (C) *10 <sup>-9</sup> m/s	$\varepsilon_{50}$ (T) %	$\varepsilon_{50}$ (C) %
17	1,148	0,840	19,45	19,43	0,5363	0,4568	2,77	2,87
34	0,807	0,559	18,93	18,89	0,3596	0,2903	5,35	5,55
68	0,599	0,490	17,88	17,82	0,3082	0,2708	10,59	10,90
136	0,906	0,724	16,48	16,42	0,2296	0,1992	17,59	17,89
272	1,065	0,741	15,12	15,04	0,1098	0,0896	24,39	24,78
544	1,693	1,303	13,70	13,66	0,0669	0,0591	31,51	31,72
1088	1,804	1,452	12,61	12,57	0,0399	0,0362	36,95	37,15

Käyttäjän määrittämä sovitussuora:

TAYLOR

$k$ *10 <sup>-9</sup> [m/s]	$\varepsilon$ [%]

CASAGRANDE

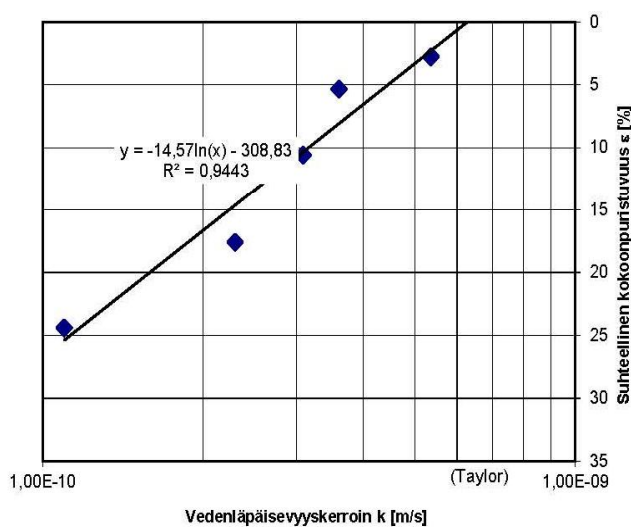
$k$ *10 <sup>-9</sup> [m/s]	$\varepsilon$ [%]

TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto  
Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorio

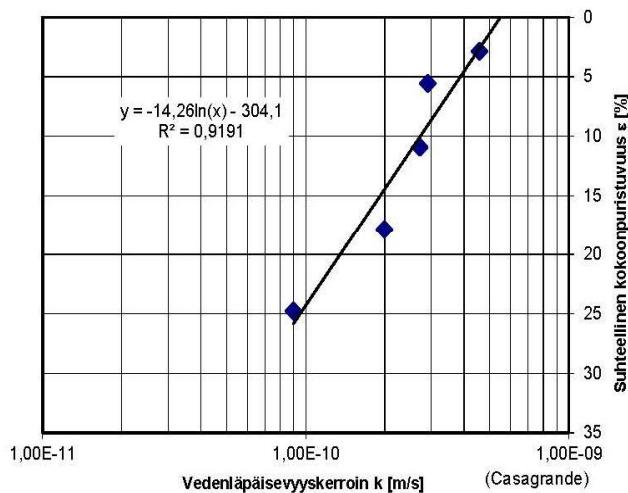
ÖDOMETRIKOE

6.2.2014

pvm.							8.10.2012		
Paikka:	HUT						N:o	6167	
Piste:	2013-R5 p 100 norj				Syvyys:	1,92-1,95			
Ödometri:									
Laite nro	ÖD5	h <sub>0</sub> , cm	2,0	A, cm <sup>2</sup>	20,0	V <sub>0</sub> , cm <sup>3</sup>	40,0		
Huom.	-								
Näyte:									
Maalaji	laSa	Sa-%	82	Humus,%	0	ρ <sub>s</sub> , t/m <sup>3</sup>	2,78	γ <sub>0</sub> ,kN/m <sup>3</sup>	15,42
w <sub>0</sub> , %	78,9	e <sub>0</sub>	2,164	n <sub>0</sub> , %	68,4	s <sub>k</sub> kPa		S <sub>t</sub>	
S <sub>r</sub> , %	100	F		w <sub>L</sub> , %		w <sub>P</sub> , %		I <sub>P</sub>	



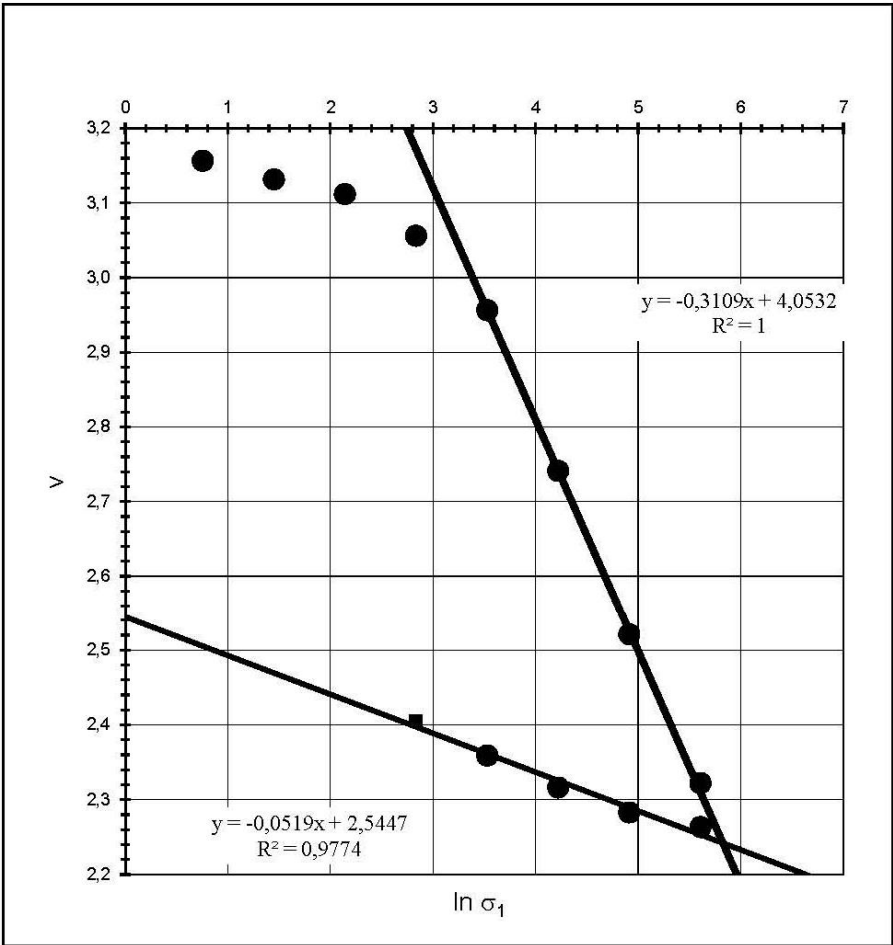
TAYLOR (trendline)				
$k_1$	0,6231	$\cdot 10^{-9}$	m/s	
$\beta_k$	2,98			
(oma valinta)				
$k_1$		$\cdot 10^{-9}$	m/s	
$\beta_k$				



CASAGRANDE (trendline)				
$k_1$	0,5476	$\cdot 10^{-9}$	m/s	
$\beta_k$	3,05			
(oma valinta)				
$k_1$		$\cdot 10^{-9}$	m/s	
$\beta_k$				



Paikka:	HUT	N:o	6167
Piste:	2013-R5 p 100 norj	Syvyys:	1,92-1,95



$\sigma_1$ kPa	$v =$ $e+1$
2,1	3,157
4,3	3,132
8,5	3,112
17,0	3,056
34,0	2,957
68,0	2,741
136,0	2,521
272,0	2,322
544,0	2,113
1088,0	1,935
272,0	2,264
136,0	2,283
68,0	2,317
34,0	2,359
17,0	2,406

$\lambda$	$\kappa$
0,311	0,0519

Cc	Cr
0,715	0,119

**Sekundaaripainuman parametrien  $C_{\alpha\epsilon \max}$ ,  $\alpha_{s \max}$  ja  $\beta_{\alpha\epsilon}$  määrittäminen:**pvm. Anna jännitys (esim.  $\sigma_p$ ):

(sin. katkoviiva)

26 kPa(C <sub>$\alpha\epsilon \max$</sub>  -arvon määrittäyskohta)

??????

 $\epsilon_1 =$ 2,108 % $0.8 \cdot \sigma_p =$ 20,8 kPa $0.8 \cdot \epsilon_1 =$ 1,6864 %

Sovitussuora:

$\sigma_1$ kPa	$\epsilon_1$ %	$C_{\alpha\epsilon}$ %
17	3,39444182	0,31
34	6,53966049	0,94
68	13,3522969	0,96
136	20,3090989	0,94
272	26,599999	0,55

Poista (Delete) tai lisää (\*) taulukkoon "Sovitussuora" ne havaintopisteet, jotka haluat ottaa huomioon Excelin määrittäessä sovitussuoraa.

(\* Esim. aktiivisen solun H32 oikeassa alareunassa pieni neliö, jonka kohdalla hiiren nuoli muuttuu ristiksi. Nuolen ollessa ristinä paina vasenta näppäintä ja vedä samalla hiirtä alaspäin riittävän monta solua.)

$$\alpha_s = C_{\alpha\epsilon} \cdot (1 + e_0) / 100$$

$$\beta_{\alpha\epsilon} = \Delta C_{\alpha\epsilon} / \Delta \epsilon$$

**Menetelmä 1:**

Käyttäjän valitsema sovitussuora (pun. katkoviiva)

Anna sovituskäyrän pisteet:

	$\sigma_1$ [kPa]	$C_{\alpha\epsilon}$ [%]
Piste 1	34	0,94
Piste 2	136	0,94

Excel-ohjelman määrittämä sovitussuora (musta viiva)

Anna sovituskäyrän kulmakertoimen ja vakion b ( $y=kx+b$ ) arvot kuvasta:

(Kulmakertoimen ja b-arvo eivät päivitty automaattisesti)

k	b
-2,00E-04	0,7617

**Menetelmä 2:**

Käyttäjän valitsema sovitussuora (pun. katkoviiva)

Anna sovituskäyrän pisteet:

	$\epsilon_1$ [%]	$C_{\alpha\epsilon}$ [%]
Piste 1	6,53966049	0,94
Piste 2	20,3090989	0,94

Excel-ohjelman määrittämä sovitussuora (musta viiva)

Anna sovituskäyrän kulmakertoimen ja vakion b ( $y=kx+b$ ) arvot kuvasta:

(Kulmakertoimen ja b-arvo eivät päivitty automaattisesti)

k	b
0,005	0,6686

**Sekundaaripainuman parametrit:****Menetelmä 1 ( $\sigma_1 - C_{\alpha\epsilon}$ ):**

Excel

 $C_{\alpha\epsilon \max}$  0,76 % $\alpha_{s \max}$  0,024 $\beta_{\alpha\epsilon}$  0,0002 %/kPa

Käyttäjä

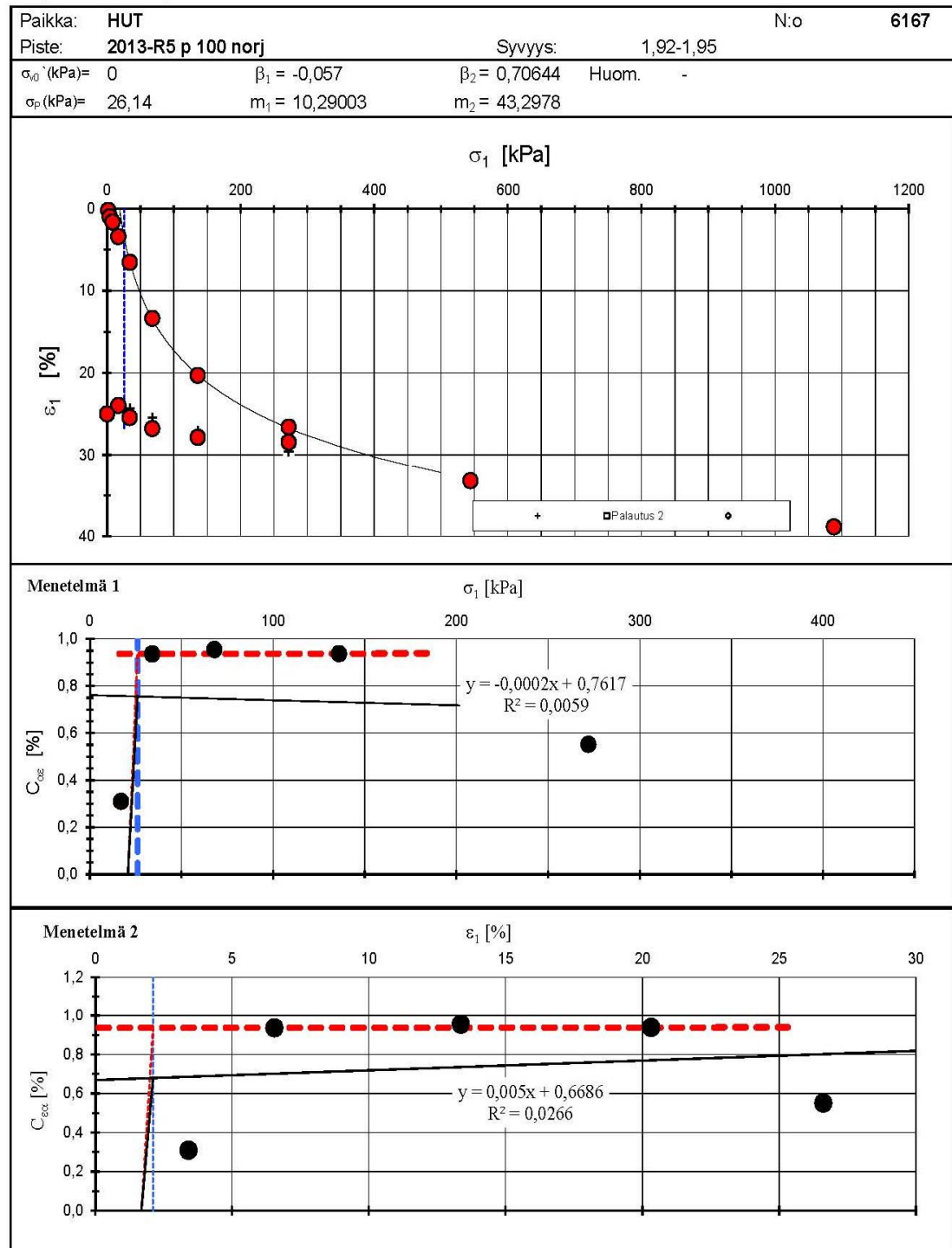
0,94 %0,0300,0000**Menetelmä 2 ( $\epsilon_1 - C_{\alpha\epsilon}$ ):**

Excel

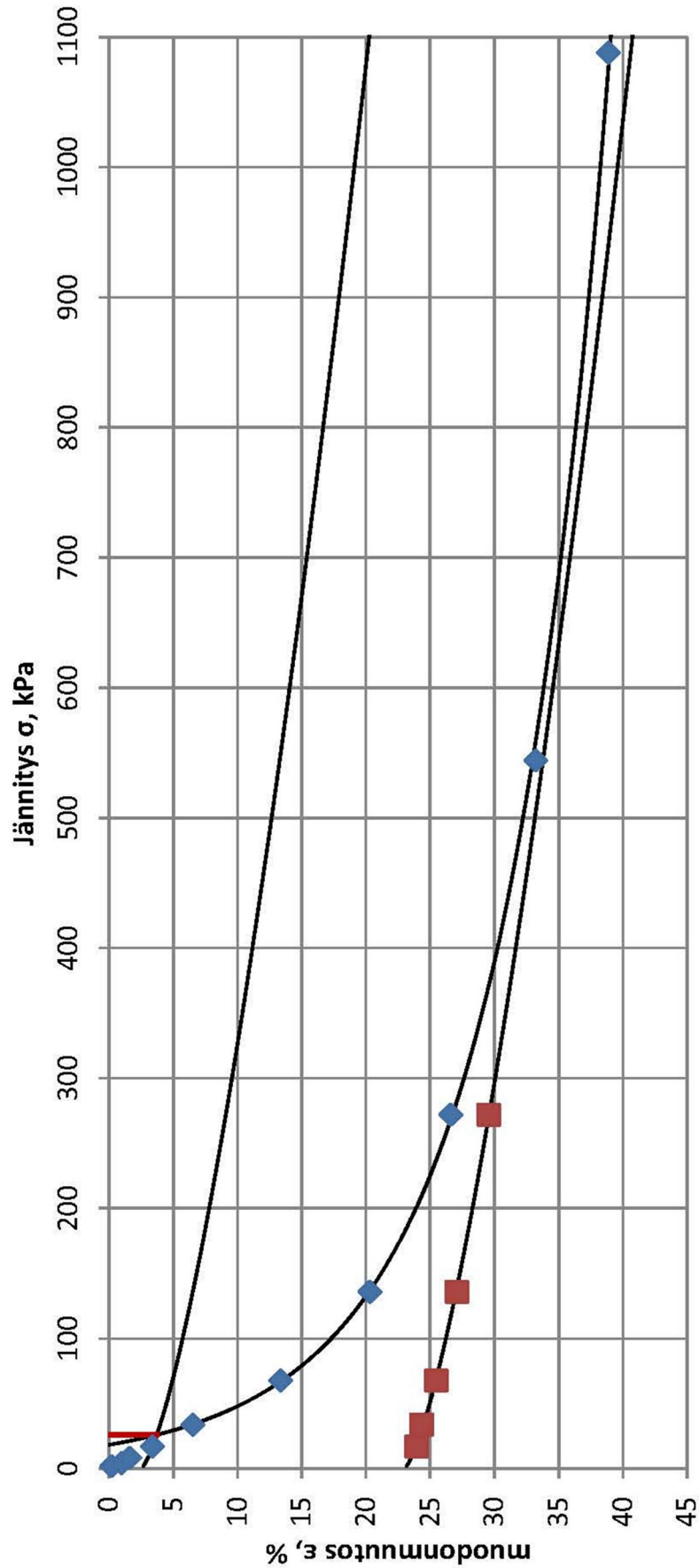
 $C_{\alpha\epsilon \max}$  0,68 % $\alpha_{s \max}$  0,021 $\beta_{\alpha\epsilon}$  -0,005

Käyttäjä

0,94 %0,0300,000



# HUT-menetelmä



**Paikka:** HUT  
**Piste, paalu:** 2013-R5 p 100 norj  
**Swvys:** 1,92-1,95  
**N:o** 6167

Näytteenottoaika: HUT


Tutkimus: Samuli Laaksonen diplomityö

Piste, paalu: 2013-O p 427 norj Syvyys: 1,92-2,04

Laboratorio numero: CAUC6246

Selli: 242

ENNEN KOETTA		Kokeen jälkeen	
Näytteen valmistelu		Heti purun jälkeen	
Kehto	g 340,84	Märkä näyte + paperit	g 296,62
Kehto + kost	g 653,14	Märät paperit	g 0,83
Kumi	g 8,01	Näytteen mittaus	
Vesipitoisuus näytteen ympäriltä		Halkaisija	Korkeus
Astia	nro 319	52,5	50,5
Astia	g 53,43	57,0	53,5
Astia + kost.	g 196,87	59,0	54,5
Astia + kuiva	g 135,60	59,0	55,5
Huokoskivien käsittely		56,0	52,5
Huokoskivien pesu	pvm 2.12.2013	Kartiokoe	
Huokoskivien imu alipaineessa	pvm 2.12.2013	Kartion paino	g 100
Huokoskivien läpäisevyyden testaus		Alapää	Keskiosa
10 cm painekorkeuseroa vastaava aika		Yläpää	
Alahuokoskivi	s 103	7,9	7,8
Ylähuokoskivi	s 18	8,0	7,5
		8,5	8,1
		8,3	8,3
		8,4	8,1
		Keskiarvo	8,00
		c <sub>u</sub>	16,8
		Vesipitoisuus	
		Alapää	Keskiosa
		Yläpää	
Astia	Nro 108		184
Astia	g 84,68		66,18
Astia + kost.	g 236,96		208,81
Astia + kuiva	g 176,25		151,04

 <b>Aalto-yliopisto</b> Insinööritieteiden korkeakoulu Pohjarakennus ja maamekaniikka		Job number:		Job title:	Samuli Laaksonen diplomi työ	Date:	2.12.2013
		Test number:	CAUC6246	Test site:	HUT	Depth:	1,92-2,04
		Test type:	Undrained	Point:	2013-O p 427 norj	Person:	SL

Cell no	242	Rate (%/hour)   (mm/min)	0,3%/h   0,005mm/min	Soil type	CI
Test start date	2.12.2013	Force measurement		Clay-%=	
Shearing date	9.12.2013	Displacement measurement		Cu(kPa)=	
Mass of the piston	0,78	Pore pressure measurement		Ip (%)=	
Area of the piston (cm <sup>2</sup> )	1	Temperature (°C)		wL (%)=	
Cell pressure (kPa)	30	Air pressure mbar		wP (%)=	
			Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> ) (Estimated)		
			2,78		

Notes	
-------	--

DETERMINATION OF WATER CONTENT										
SAMPLE DIMENSIONS					AFTER SHEAR					
BEFORE CONSOLIDATION		AFTER CONS.		AFTER SHEAR		BEFORE CONSOLIDATION			AFTER SHEAR	
Diameter (cm)	d0= 5,034	d1= 4,880	d2= 5,180			Sample	Sample trimmings	Top	Middle	Bottom
Height (cm)	h0= 10	h1= 9,67	h2= 8,580			Moist sample (g)	143,44	Moist sample (g)	152,28	142,63
Area (cm <sup>2</sup> )	A0= 19,900	A1= 18,702	A2= 21,078			Dry sample (g)	82,17	Dry sample (g)	91,57	84,86
Volume (cm <sup>3</sup> )	V0= 199,00	V1= 180,85	V2= 180,85			Water (g)	61,27	Water (g)	60,71	57,77
Density (g/cm <sup>3</sup> )	TiH0 1,569	TiH1 1,727	TiH2 1,727			Water content (%)	74,56	Water content (%)	66,3	68,1
Dry density (g/cm <sup>3</sup> )	KuTi0 0,887	KuTi1 0,976	KuTi2 0,976			Average (%)			67,2	
Void ratio	e0= 2,136	e1= 1,850	e2= 1,850							
Porosity	n0= 68,11	n1= 64,91	n2= 64,91							
Degree of saturation	Sr0= 100	Sr1= 0	Sr2= 0							

MEASURED SAMPLE AFTER THE TEST				CHECK FOR LEAKS	
Mean diameter after the test (d2meas.) (cm)		5,50	Change of volume (cm <sup>3</sup> )		18,15
Height of the sample after the test (h2meas.) (cm)		7,55	Change of mass (g)		-17,39
Number of diameter measurements		10,00	Conclusion (OK?)		OK!

MEASUREMENTS DURING TEST				
Byrette reading at the beginning of the consolidation (cm <sup>3</sup> )=				
37,95				
Byrette reading at the end of the consolidation (cm <sup>3</sup> )=				
19,80				
Byrette reading at the start of the shear (cm <sup>3</sup> )=				
0,00				
Settlement during the consolidation dh (cm)=				
0,33				
Settlement at the end of the test dh (cm)=				
1,420				

